

Херсонська державна морська академія
Міністерства освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

АГЄЄВ МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 29.424.3:621.436:004.58

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

Науковий консультант Грицук Ігор Валерійович, доктор технічних наук,
професор

Херсон – 2021

АНОТАЦІЯ

Агеєв 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 (275 –Транспортні технології) – Харківський національний автомобільно – дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

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

Науково – обґрунтований пошук, розробка і впровадження високопродуктивних, простих в експлуатації, наукомістких технологій відновлення деталей засобів транспорту для досягнення високих показників надійності транспортних засобів – актуальна наукова проблема.

Вирішення цієї проблеми вимагає впровадження в практику зміцнення, відновлення і підвищення надійності транспортних засобів та їх елементів нових і вдосконалення існуючих процесів ремонту, що базуються на наукових дослідженнях в області нанесення багатофункціональних покриттів.

Узагальнення результатів досліджень основних видів зношування елементів засобів транспорту дозволив зробити висновок, що вони працюють в умовах, при яких експлуатаційні навантаження (тиск, температура, дія навколишнього середовища, тощо) сприймає, головним чином, їх поверхневий шар і тому, достатньо відновлювати не всю деталь, а тільки її зношені робочі поверхні шляхом нанесення на них багатофункціональних покриттів. Розробці способів відновлення деталей транспортних засобів зміцнюючими захисними покриттями для забезпечення надійності та підвищення ресурсу конструктивних елементів вузлів та агрегатів засобів транспорту присвячені роботи М.А. Подригало, О.С. Полянського,

К.А. Ющенко, Ю.С. Борисова, Ю.С. Харламова, Б.А. Ляшенко, Є.К. Посвятенко та інших вчених в галузі ремонту.

В дисертаційній роботі доведено, що надійність засобів транспорту та їх елементів в процесі ремонту доцільно забезпечувати шляхом використання комбінованих способів нанесення багатофункціональних покриттів. При цьому 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 транспортних засобів.

Шляхом проведених досліджень і їх аналізу показана ефективність синтезу електроіскрового легування, електродугового напилення і імпульсного іонного азотування для створення комбінованої методу нанесення багатофункціональних покриттів з метою забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту в процесі відновлення їх конструктивних елементів. Обґрунтовано, що серед способів нанесення багатофункціональних покриттів найбільш поширений, найдешевший і найпростіший метод електродугового напилення. Підвищити адгезійну і когезійну міцність напилених покриттів можливо шляхом поєднання процесу електродугового напилення з електроіскровим легуванням, 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 ймовірності їх деформації можна забезпечити обробкою електродугових покриттів електроіскровим легуванням.

Для використання комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів в процесі ремонту розроблена методологія управління ресурсом деталей засобів транспорту та їх елементів на основі впливу управляючої дії факторів комбінованої технології відновлення при формуванні покриттів. Методологія дисертації складається з послідовності дій встановлення структурних зв'язків між теоретичними та

експериментальними дослідженнями, що спираючись на комплекс статистичних та математичних методів, а саме методів морфологічного аналізу, теорії множин, математичної статистики, регресійного аналізу.

В дисертаційній роботі представлена концепція 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 на напиленні покриття. Розроблені основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту, що відображають функціональні, експлуатаційні, матеріально-технічні та технологічні аспекти ремонту деталей транспортних засобів шляхом використання зміцнюючих захисних покриттів, нанесених комбінованим способом. 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.

Для ефективного вирішення проблеми забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту та їх елементів була виявлена системна взаємодія факторів, що визначають хід процесу, які представлені у вигляді системних взаємозв'язків при формуванні процесу ремонту.

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано системний підхід, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту та їх елементів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем. В основу покладено вивчення кожного елементу 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.

Системність і комплексний методологічний підхід щодо визначення закономірностей впливу режимів комбінованого способу формування багатофункціональних покриттів, що включає електроіскрове легування, електродугове напилення та імпульсне іонне азотування, на їх фізико-механічні властивості дозволяють логічно впорядкувати складні теоретичні і експериментальні дослідження на спільній методично-інформаційній базі.

Засоби транспорту різного призначення – складна технічна система, яка складається з багатьох модулів, систем, вузлів, агрегатів і окремих конструкційних елементів, надійність яких впливає на безпеку їх роботи. Визначення закономірностей впливу комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів на характеристики міцності зчеплення і зносостійкості дозволили створити основу для розробки принципу управління процесом ремонту з метою забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту та їх елементів. Тому дослідження в дисертаційній роботі представлені єдиною системою, що дало можливість оцінити взаємодію всіх її частин і об'єднати їх на необхідній методологічній основі.

Виходячи із системного підходу, організація досліджень представлена у вигляді ієрархічної структури наступних методологічних рівнів: 1) формалізації проблеми дослідження, що включає відображення сутності та актуальності проблеми, визначення мети, загальну постановку задачі та шляхів її вирішення; 2) концептуальних досліджень, що включають комплексний підхід до аналізу існуючих способів ремонту, формування з них ремонтної технології, що забезпечить надійність засобів транспорту та їх елементів; 3) операційних досліджень, що враховують обґрунтований вибір обладнання, матеріалів, режимів, способів управління та контролю процесу ремонту елементів засобів транспорту на всіх етапах; 4) заключного етапу вибору оптимальних технологічних параметрів ремонтного процесу, що

дозволить вирішити наукову проблему.

В роботі розроблений комбінований спосіб отримання багатофункціональних покриттів, що включає електроіскрове легування, електродугового напилення і імпульсне іонне азотування. Доцільність методу електроіскрового легування обґрунтована для підвищення міцності зчеплення напилених покриттів. Для отримання щільних покриттів з високою міцністю зчеплення підтверджена необхідність електродугового напилення струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші. Визначено вплив параметрів електродугового напилення на фізико механічні властивості відновлених поверхонь (пористість, мікротвердість, міцність зчеплення, зносостійкість і корозійну стійкість). Підвищити твердість і зносостійкість відновлюваних поверхонь з напиленими покриттями, високі експлуатаційні властивості і надійність деталей засобів транспорту доцільно і можливо їх обробкою імпульсним іонним азотуванням. Дослідження взаємозв'язків поміж параметрами процесу імпульсного іонного азотування та ступеня їх впливу на глибину дифузії азоту дозволили забезпечити необхідну мікротвердість та зносостійкість покриттів, отриманих електродуговим напиленням. Встановлені загальні закономірності між параметрами процесу відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту які дозволяють керувати режимами комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів.

Розроблені моделі, методи, проведений синтез основних видів зношування деталей транспортних засобів, способів забезпечення їх надійності дозволяють реалізувати комбінований метод відновлення зношених поверхонь деталей засобів транспорту багатофункціональними покриттями, встановити параметри ремонтного процесу, що забезпечують задану якість відновлених поверхонь. Розроблений комбінований спосіб відновлення деталей транспортних засобів шляхом оптимізації процесу нанесення покриттів, вибору їх матеріалу, управління його складом і структурою в процесі ремонту дозволив підвищити їх експлуатаційні

властивості більш ніж в 2 рази в порівнянні з традиційними способами та вирішити задачу забезпечення їх ресурсу, який не поступається ресурсу нових деталей.

Представлена схема процесу відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. Комбінований спосіб відновлення пройшов апробацію при відновлення розподільних валів судових дизель-генераторів і валів судових насосів. Розроблено практичні рекомендації щодо відновлення валів судових дизель – генераторів і судових насосів комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. Виконана дисертаційна робота дозволила розширити номенклатуру відновлюваних деталей засобів транспорту, 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 «Експлуатація судових енергетичних установок» та при викладанні дисциплін «Організація та технологія судноремонту» і «Технічне обслуговування і ремонт судових технічних засобів».

Ключові слова: засоби транспорту, багатофункціональні покриття, електродугове напилення, імпульсне іонне азотування, електроіскрове легування, комбінований спосіб, експлуатаційні властивості, міцність зчеплення, щільність, мікротвердість, твердість, зносостійкість, корозійна стійкість.

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. Vrublevskiy, 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. Pohorletskyi, 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. Агеев 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. Агеев, 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. Агеев 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. Pohorletsnyi, 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: КДАВТ, 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 НІУ 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 – 2019: 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 теорій адгезии в формировании упрочняющих покрытий. Инженерия поверхности и реновация изделий: матеріали 18 – ї 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 Інженерія 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 – її 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. Ю.В. Волков, М.С. Агеев, Е.К. Соловых 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: теория и практика: материалы 16 – ой международной научно – практической конференция. (20 – 23 сентября 2016, Одесса). Одесса: 2016. С. 184 – 188.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

48. 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.

ABSTRACT

M.S. Ahieiev 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 (275 – Transport technologies) – 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 of means of transport and their elements by application of multipurpose coverings in the course of repair.

Scientifically based search, development and implementation of high-performance, easy-to-use, knowledge-intensive technologies for the restoration of vehicle parts to achieve high reliability of vehicles – an urgent scientific problem. Solving this problem requires the introduction into practice of strengthening, restoring and improving the reliability of vehicles and their elements, new and improving existing repair processes based on research in the field of multifunctional coatings.

The generalization of the results of research on the main types of wear of vehicle elements allowed us to conclude that they work in conditions where operating loads (pressure, temperature, environmental action, etc.) are perceived mainly by their surface layer and therefore it is enough to restore not all parts, and only its worn out working surfaces by drawing on them multipurpose coverings.

The development of methods for the restoration of vehicle parts with

reinforcing protective coatings to ensure the reliability and increase the life of structural elements of components and units of vehicles is devoted to the work of M.A. Podryhalo, O.S. Polianskyi, K.A. Yushchenko, Yu.S. Borysov, Yu.S. Kharlamov, B.A. Liashenko, E.K. Posviatenko and other scientists in the field of repair.

In the dissertation it is proved that the reliability of vehicles and their elements in the repair process should be ensured by using combined methods of multifunctional coatings. It is important to choose the right simple and affordable ways to apply multifunctional coatings, which as a result of the synthesis will be part of the combined method and will increase the life of vehicles.

Through research and their analysis shows the effectiveness of the synthesis of electro spark doping, electric arc spraying and pulsed ionic nitriding to create a combined method of multifunctional coatings to ensure the reliability and resource life of vehicles in the process of restoring their structural elements. It is substantiated that among the methods of applying multifunctional coatings the most common, cheapest and simplest method of electric arc spraying. It is possible to increase the adhesive and cohesive strength of sprayed coatings by combining the process of electric arc spraying with electro spark alloying, given its disadvantage as a significant surface roughness.

The greatest effect on bearing capacity, increase of hardness, wear resistance and endurance of the restored details with the sprayed coverings at decrease in probability of their deformation can be provided by processing of electro arc coverings by electro spark alloying.

To use the combined method of applying multifunctional coatings in the repair process, a methodology for managing the resource of vehicle parts and their elements based on the influence of the control action of the factors of the combined recovery technology in the formation of coatings. The methodology of the dissertation consists of a sequence of actions to establish structural links between theoretical and experimental research, based on a set of statistical and mathematical methods, namely methods of morphological analysis, set theory,

mathematical statistics, regression analysis.

The dissertation presents the concept of ensuring the reliability of vehicle parts in the process of their repair, which takes into account the structural and morphological features of the recoverable surface after electro spark treatment, the influence of electric arc spraying on the quality of the coating-renewable surface and the modifying effect of pulsed ion nitriding.

The basic principles of forming the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of vehicles in the repair process, reflecting the functional, operational, logistical and technological aspects of repair of vehicle parts by using reinforcing protective coatings applied in a combined way.

The implementation of the concept is based on the use of a systematic approach, analysis of materials, features of equipment designs, modes of processing at the stages of the repair process, basic statistical and mathematical methods, experimental research.

To effectively solve the problem of ensuring the reliability and resource life of vehicles and their elements, a systematic interaction of factors that determine the course of the process, which are presented in the form of systemic relationships in the formation of the repair process.

The scientific basis for the rational and effective achievement of the research goal is a systematic approach, namely a set of methodological principles and provisions that allow us to consider the reliability and resource life of vehicles and their elements as a single system with the coordination of all its subsystems. It is based on the study of each element of the system in its connection and interaction with other elements, observation of changes in the system, identification of specific system properties, making reasonable assumptions about the patterns of system development and determining rational modes of its operation.

Systematic and comprehensive methodological approach to determine the patterns of influence of modes of the combined method of forming multifunctional coatings, including electro spark doping, electric arc spraying and pulsed ionic nitriding, on their physical and mechanical properties allow to logically

organize complex theoretical and experimental information on joint information.

Vehicles for various purposes – a complex technical system consisting of many modules, systems, components, units and individual structural elements, the reliability of which affects the safety of their work. Determining the patterns of influence of the combined method of applying multifunctional coatings on the characteristics of adhesion strength and wear resistance allowed to create a basis for developing the principle of repair process control to ensure the reliability and resource life of vehicles and their elements. Therefore, the research in the dissertation is represented by a single system, which made it possible to assess the interaction of all its parts and combine them on the necessary methodological basis.

Based on a systematic approach, the organization of research is presented in the form of a hierarchical structure of the following methodological levels:

- formalization of the research problem, including reflection of the essence and relevance of the problem, goal setting, general problem statement and solutions;
- conceptual research, including a comprehensive approach to the analysis of existing methods of repair, the formation of repair technology, which will ensure the reliability of vehicles and their elements;
- operational research, taking into account the reasonable choice of equipment, materials, modes, methods of management and control of the process of repair of elements of vehicles at all stages;
- the final stage of choosing the optimal parameters of the repair process, which will solve the scientific problem.

The combined method of obtaining multifunctional coatings, including electro spark doping, electric arc spraying and pulsed ionic nitriding, is developed in the work.

The expediency of the method of electro spark doping is justified to increase the bond strength of sprayed coatings.

To obtain dense coatings with high bond strength, the need for electric

arcspraying with a jet of combustion products of propane-air mixture is confirmed.

The influence of the parameters of electric arc spraying on the physical and mechanical properties of the restored surfaces (porosity, microhardness, adhesion strength, wear resistance and corrosion resistance) is determined.

To increase the hardness and wear resistance of renewable surfaces with sprayed coatings, high performance properties and reliability of vehicle parts, it is advisable and possible to treat them with pulsed ionic nitriding. The study of the relationships between the parameters of the pulsed ionic nitriding process and the degree of their influence on the depth of nitrogen diffusion allowed to provide the necessary microhardness and wear resistance of coatings obtained by electric arc spraying.

The general regularities between parameters of process of restoration of working surfaces of details of vehicles which allow to operate modes of the combined way of drawing of multipurpose coverings are established.

Developed models, methods, synthesis of the main types of wear of vehicle parts, ways to ensure their reliability allow to implement a combined method of restoring worn surfaces of vehicle parts with multifunctional coatings, to establish parameters of the repair process that ensure the quality of restored surfaces. The developed combined method of restoration of details of vehicles by optimization of process of drawing of coverings, a choice of their material, management of its structure and structure in the course of repair allowed to increase their operational properties more than 2 times in comparison with traditional methods and to solve a problem of providing their resource which does not concede. resource of new parts.

The scheme of the process of restoration and increase of operational properties of details of vehicles by the combined method of drawing multipurpose coverings is presented. The combined method of recovery has been tested in the restoration of the camshafts of marine diesel generators and shafts of marine pumps. Practical recommendations for the restoration of shafts of marine diesel generators and marine pumps by a combined method of applying multifunctional

coatings have been developed. The performed dissertation allowed to expand the range of renewable parts of vehicles, to organize a site for their restoration and repair.

Experimental and industrial verification of research results was performed in production conditions at LLC «Motortech» (Pervomaisk), at the Kherson State Plant «Palada» (Kherson), JSC «Ukrainian Railways» regional branch «Donetsk Railway» structural unit «Popasnyanske locomotive depot» during the restoration of «shaft» type parts and at Energoatom NNEGC Atomenergomash, repair and mechanical plant (Yuzhnoukrainsk).

The conclusions and main results of the dissertation are used in the preparation of masters of technical specialties at the Kherson State Maritime Academy at the Department of «Operation of ship power plants» and in teaching disciplines «Organization and technology of ship repair» and «Maintenance and repair of ship equipment».

Keywords: means of transport, multifunctional coatings, electric arc spraying, pulsed ionic nitriding, electro spark alloying, combined method, performance properties, bond strength, density, microhardness, hardness, wear resistance

List of publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. M.S. Ahieiev, IV Gritsuk, E.K Solovykh Application of combined recovery technologies to increase the life of parts of vehicles. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport, 2020, Vol. 194. P. 81 – 92.

2. M.S. Ahieiev, A.V. Rutkovsky, O.P. Grishchenko, E.K. Solovykh, S.O. Magopets Renovation of parts for transport by the combined method of applying various functionalities. Science magazine «Visnik of Khmelnytsky National University». Technical sciences. 2020. №3 (285). P. 268 – 277. DOI 10.31891/2307 – 732.

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. <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01 – 2022>. Title from the screen (Scopus Q2).

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. M.S. Ageev, M.V Golovashchuk Improving the performance of vehicle parts by controlling the factors of the process of electric arc spraying of multifunctional coatings Scientific Journal «Bulletin of Khmelnytsky National University». Technical sciences. 2019 №3 (273). P. 240 – 248. DOI 10.31891 / 2307 – 5732.

6. I. Gritsuk, D. Pohorletskyi, 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. <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01–2031>. Title from the screen (Scopus Q2).

7. M.S Ageev. Investigation of the possibility of improving the quality of electric arc coatings by treatment with pulsed ion azating. Systems and transport. Problems of exploitation and diagnostics (protocol dated 30.08. 2019 p. №1 ISBN – 978 – 966 – 2245 – 53 – 0): monograph. – Kherson: 2019. p. 95 – 108.

8. M.S. Ageev, MA Bilotserkivsky, V.M Lopata, N.V. Vigilyanskaya The use of structural anomalies in steel gas – thermal coatings while increasing the wear resistance of vehicles. Scientific journal «Bulletin of Khmelnytsky National University». Technical sciences. 2020, №4. Volume 1 (287), pp. 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. <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01 – 2107>. Title from the screen. (Scopus Q2).

11. M.S. Ahieiev Research of kinetics of measurement of electrochemical potential in time at increase of corrosion resistance of details Scientific journal «Bulletin of Khmelnytsky National University». Technical sciences. 2019 №6 (279). Pp. 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. Order URL: <http://worldcat.org/issn/19463936/>. Title from the screen (Scopus Q1).

13. M.S. Ahieiev, I.V. Gritsuk, A.V. Rutkovsky, A.E.Solovykh, E.K. Katerinich Pre-sludge to the process of pulsed ion vacuum thermocycling nitrogen treatment in the plasma of a pulsating glow discharge. Science magazine «Visnik of Khmelnytsky National University». Technical sciences. 2020. №6 (291). P. 107 – 116. DOI 10.31891/2307 – 5732.

14. B.A. Lyashenko, O.A. Mikosyanchik, M.S. Ageev Analysis of tribotechnical characteristics of self-fluxing coatings in rolling conditions with sliding under non-stationary loading Science journal «Technological audit and reserves of production». Poltava: 2016. No. 2/1 (28). S. 4 - 9.

15. N.E. Kozhevnikova, M.S. Ageev, S.L. Chigray Increasing the service life of marine pumps based on combined recovery technology. Collection of

scientific works «Water transport» Kiev: 2015. Issue number 2 (24). P. 57 – 70.

16. M.S. Ageev, Yu.V. Volkov, S.L. Chigray Strengthening coatings in shipbuilding and ship repair Science Newsletter of the Kherson State Marine Academy. Kherson: 2015. №2 (13). P. 110 – 124.

17. N.N. Danilin, A.A. Abdulaev, M.S. Ageev, V.I. Sviridov Vibration diagnostics of the MCP. Collection of scientific papers of the National University of Nuclear Energy and Industry. 2012 №7. P. 87 – 89.

18. E.V. Belousov, M.S. Ageev and V.I. Sviridov Influence on the working process of a medium – speed marine diesel engine by injecting water into the working cylinder. All-Ukrainian scientific and technical journal «Internal combustion engines» Kharkiv: 2011. №1. P. 40 – 43.

19. N.M. Shaitor, I.V., Pletyaniy, A.N. Pinchuk, M.S. Ageev Possible ways to optimize the vibration-noise parameters of electric motors Collection of scientific works of the Academy of Naval Forces named after P.S Nakhimova. 2011. №3 (7). P.87 – 89.

20. M.S. Ageev Stagnation of methods of analytical mechanics for the establishment of the model of changing the mass in the working zones of the SEP elements. Interuniversity collection «Science notation». Lutsk: 2013. Issue №40. P. 4 – 6.

21. E.V. Belousov, M.S. Ageev, N.N. Kobayakov Complex utilization of fuel separation waste in ship power plants Scientific and technical journal «Bulletin engine building». Zaporozhe: Motor Sich, 2011. №2. P. 111 – 114.

22. A.V. Dudan, M.S. Ageev, A.V. Rutkovsky, V.I. Mirnenko, O. V. Radko Investigation of the process of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge. Construction of a mathematical model of the process Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Mechanical engineering and mechanical engineering. Novopolotsk: 2020. №4. P. 40 – 48.

23. T.V. Vigerina, M.S. Ageev, K.A. Danko Assessment of the influence of the parameters of thermal spraying of coatings on their properties by using the

methods of mathematical planning. Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Mechanical engineering and mechanical engineering. Novopolotsk: 2017. №1. P. 35 – 40.

24. Yu.V. Volkov, T.V. Vigerina, M.S. Ageev Reconstruction of shafts of diesel generators by electrocontact sintering of discrete coatings Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Mechanical engineering and mechanical engineering. Novopolotsk: 2016. №3.P. 82 – 89.

25. M.S. Ageev, A.V. Dudan, T.V. Vorona, B.A. Lyashenko Application of hybrid technologies for renovation and increasing the service life of ship machines and mechanisms. Bulletin of the Brest State Technical University. Scientific – theoretical journal Mechanical engineering. Brest: 2015. Vol. №4(94). P. 18 – 22.

26. M.S. Ageev, N.E. Kozhevnikova, V.N. Shovel Restoration of shafts of marine pumps using a combined method of applying protective coatings. Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. Kherson: 2015, №2(13). P. 4 – 16.

27. Yu.V. Volkov, E.K. Solovykh, M.S. Ageev Welding and related processes in shipbuilding. Collection of scientific works «Water transport» Kiev: 2015. Vol. №2 (24). P. 15 – 26.

28. V.V. Sapiga, A.L. Kiryukhin, G.F. Romanovsky M.S. Ageev. Diffusion and mass transfer in systems of individual lubrication of bearings of ship shafts on water-cut oil. Collection of Science Workers of the Academy of Military – Sea Forces imeni P.S Nakhimova. 2011. №3 (7). P.148 – 157.

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

Publications which prove approbation of the dissertation materials:

30. M.S. Ageev Transition from galvanic technology to thermal gas technologies in the production of anticorrosive coatings. 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. M.S. Ageev, M.F. Kovalev Operating conditions, causes and types of wear of shafts of internal combustion engines and increasing their wear resistance and service life. Increase of Machine and Equipment Reliability: materials of the international scientific and practical conference (15 – 17 April 2020, Kropyvnytskyi). Kropyvnytskyi: 2020. P. 119 – 124.

32. 34. 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. M. S. Ageev Influence of parameters of equipment for electric arc spraying on the factors of the spraying process and properties of protective coatings for parts of ship machines and mechanisms: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu.Ya. i Semenova V.S. Odessa: 2020, P. 134 – 140.

34. M.S. Ageev, M.A. Bilotserkivsky Improvement of the characteristics of thermal gas coatings by chemical – thermal treatment. Adjustment of the reliability of machines and possession. (Increase of Machine and Equipment Reliability): materials of the international scientific and practical conference (15 – 17 April 2020, Kropyvnytskyi). Kropyvnytskyi: 2020. P. 74 – 80.

35. A.P. Zinkovskii, A.V. Rutkovsky, M.S. Ageev Influence of pulsed ion nitriding on the properties of coatings obtained by electric arc spraying. Innovative technologies in mechanical engineering: collection of materials of the international scientific and technical conference (April 21 – 22, 2020, PSU, Novopolotsk). Novopolotsk, Belarus: 2020. P. 92 – 102.

36. M.S. Ageev, A.V. Rutkovsky, M.A. Bilotserkivsky Improving the properties of thermal gas coatings by nitriding. Surface engineering and product

renovation: materials of the 20th international scientific and technical conference (1 – 5 worm 2020, Kiev). Kiev: 2020. P. 55 – 10.

37. M.S. Ageev, E.K. Solovykh, Yu.V. Volkov Restoration of marine diesel generator shafts with discrete structure coatings: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Yu. Ya. Fomin. i Semenova V.S. Odessa: 2019. P. 126 – 130.

38. A.P. Zinkovskii, M.S. Ageev Feasibility of treating EAS coatings with thermocyclic ion nitriding. Kherson, 2019. P. 178 – 181.

39. M.S. Ageev, L.M. Shpak, V.I Kavun. Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts: materials of the international science and practice conference dedicated to the memory of professors Yu. Ya Fomina i Semenova V.S. Odessa: 2019. P. 126 – 130.

40. B.A. Lyashenko, M.C. Ageev, L.A. Lopata The role of adhesion theories in the formation of hardening coatings. Surface engineering and product renovation: materials of the 18 – th International Science and Technology Conference (4 – 8th April 2018, Zakarpatska region, Svalyava). Kiev: ATM of Ukraine. 2018. P. 6 – 10.

41. B.A. Lyashenko, M.S. Ageev, S.L. Chigray Management of diffusion of porous coatings in the minds of thermocycling ionic nitrogen Engineering of surface and renovation of products: materials of the 17 – th international scientific and technical conference (May 29 – June 2, 2017, Odessa). Odessa: ATM of Ukraine. 2017. P. 111 – 114.

42. B.A. Lyashenko, M.S. Ageev, S.S. Mikhailyuta Estimation of the specific power of internal combustion engines with pistons treated with impulse nitriding. Modern energy installations on transport, technologies and possessions for their servants: materials of the 8 – th international scientific and practical conference (28 – 29 spring 2017, Kherson). Kherson: 2017. P. 451 – 455.

43. M.S. Ageev, V.N. Lopata, M.A. Bilotserkivsky Structural features in steel gas – thermal coatings and the possibility of their use Current problems of preparation, production and repair in industry and on transport: materials of the

16th international scientific and technical seminar (22 – 26 February 2016, Transcarpathian region) Kiev: ATM of Ukraine. 2016. P. 12 – 16.

44. B.A. Lyashenko, M.S. Ageev Analysis of information flows, trends and main strategic directions of development of the shipbuilding and ship repair industry. Modern energy installations in transport, technology and possession for their service: materials of the international scientific and practical conference (24 – 25 spring 2015, Kherson). Kherson: 2015. P. 250 – 252.

45. S.K. Fomichev, V.N. Lopata, M.S. Ageev Restoration and hardening of wearing parts of armored personnel carriers by electric arc spraying. Quality, standardization and control: theory and practice: materials of the 15 – th international scientific and practical conference (15 – 18 spring 2015, Odessa region, Zatoka). Kiev: ATM of Ukraine, 2015. P. 184 – 188.

46. Yu.V. Volkov, M.S. Ageev, E.K. Solovykh Restoration of the shafts of marine diesel generators by electrocontact sintering of coatings with a discrete structure. Modern power plants in transport, technologies and equipment for servicing: materials of the international scientific and practical conference (September 24 – 25, 2015, Kherson). Kherson: 2015. P. 262 – 263.

47. M.S. Ageev, E.E. Kozhevnikova, S.L. Chigray Method of increasing the service life of marine pumps based on combined recovery technology. Modern energy installations on transport, technology and possession for their servants (SEUTTO – 2015): materials of the international scientific and practical conference (24 – 25 spring 2015, Kherson). Kherson: 2015. P. 57 – 58.

48. B.A. Lyashenko, M.S. Ageev Investigation of thermocyclic creep and long-term strength of coatings on niobium alloys. Quality, standardization, control: theory and practice: materials of the 16 – th international scientific and practical conference. (September 20–23, 2016, Odessa). Odessa: 2016. P. 184 – 188.

Works that further reflect the scientific results of the thesis:

49. The method of applying coating from composite material to machine parts. Patent No.130155 Ukraine: B22F 7/00, C23C 30/00 (2006), publ. 26.11.2018, Bul. №22.6

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	35
Вступ.....	37
Розділ 1 Аналіз чинників, що впливають на експлуатаційні властивості ЗТ та їх підвищення шляхом використання в ремонтних технологіях ЗЗП. Стан проблеми. Мета і задачі дослідження.....	46
1.1 Стратегія експлуатації вітчизняного парку ЗТ. Аналіз технічного стану та умов експлуатації ЗТ, інформаційних потоків і тенденцій ремонтного напрямку.....	47
1.2 Оцінка впливу експлуатаційних факторів на конструктивні елементи ЗТ різного призначення.....	54
1.3 Конструктивні матеріали для деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту.....	61
1.4 Вимоги до ЗЗП, характеристика та вибір методів їх формування на КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ.....	63
1.5 Оцінка стану проблеми підвищення експлуатаційних властивостей ЗТ на основі використання в процесі ремонту ЗЗП.....	65
1.6 Тенденції розвитку комбінованих, інтегрованих, гібридних методів нанесення ЗЗП	79
1.7 Обґрунтування вибору ЕДН в якості базового методу для синтезу комбінованого способу відновлення деталей ЗТ.....	83
1.8 Аналіз технологій для створення комбінованого методу відновлення ЗЗП з поліпшеними фізико – механічними і експлуатаційними властивостями.....	87
1.9 Синтез ЕДН, ЕІЛ та ПА для створення комбінованого способу відновлення деталей ЗТ.....	91
1.10 Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження.....	95
Розділ 2 Концепція забезпечення надійності деталей ЗТ в процесі їх ремонту, основні принципи її формування та реалізації на базі системного підходу.....	98

2.1 Загальна методологія дисертаційного дослідження.....	98
2.2 Концепція забезпечення надійності деталей ЗТ в процесі їх ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів.....	101
2.3 Формалізація завдання забезпечення заданих властивостей багатофункціональних покриттів.....	105
2.4 Математичний опис і розробка математичних моделей технологічного процесу відновлення.....	112
2.4.1 Математичне моделювання.....	114
2.4.2 Вибір і обґрунтування критеріїв оптимізації.....	131
2.4.3 Вибір керованих факторів та побудова плану експерименту.....	134
2.5 Висновки до розділу 2.....	136
Розділ 3 Загальна методологія, технологічна база, матеріали та методи.....	139
3.1 Загальна методика досліджень.....	139
3.2 Технологічна база для досліджень відновлених поверхонь деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.....	141
3.2.1 Обґрунтування вибору конструкції апарату для ЕДН.....	141
3.2.2 Характеристика установки та інструменту для ЕІЛ.....	148
3.2.3 Устаткування для ПА.....	152
3.3 Вибір матеріалів покриттів для досліджень.....	157
3.4 Дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень в покриттях, отриманих комбінованим методом.....	165
3.5 Методика кількісної стереофрактографічної оцінки морфологічних особливостей відновлених поверхонь після ЕІЛ.....	170
3.6 Визначення мікротвердості і твердості відновлюваних поверхонь.....	173
3.7 Методи оцінки пористості покриттів.....	174
3.8 Дослідження корозійної стійкості зразків з покриттями.....	175

3.9 Розрахунково – експериментальна методика визначення адгезійної міцності системи «відновлювана поверхня –покриття».....	178
3.10 Експериментально – розрахунковий метод визначення залишкових напружень.....	183
3.11 Методика оцінки НДС системи «відновлювана поверхня – покриття».....	185
3.12 Втомні випробування відновлених поверхонь з покриттями.....	189
3.13 Випробування на тертя і зношення.....	191
3.14 Методика обробки результатів досліджень.....	193
3.15 Висновки до розділу 3.....	194
Розділ 4 Управління якістю поверхонь, конструктивних елементів деталей засобів транспорту відновлених шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим способом.....	198
4.1 Схема покриття, отриманого комбінованим способом, і технологічні методи його формування при відновленні поверхонь деталей ЗТ.....	199
4.2 Вплив процесу електроіскрової обробки поверхонь, що відновлюються на адгезійну міцність ЕДН – покриттів.....	199
4.3 Керування факторами процесу електродугового напилення покриттів для підвищення властивостей відновлюваних поверхонь.....	202
4.3.1 Основні підходи управління процесом ЕДН для підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ.....	202
4.3.2 Моделювання процесу ЕДН. Отримання залежностей для прогнозування параметрів напилення і аналітичної оцінки їх впливу на якість відновлення.....	205
4.4 Характеристика процесу азотування і імпульсному режимі, його особливості.....	218
4.5 Визначення характеристик ЕДН – покриттів для доцільності їх обробки ПА.....	221

4.6 Моделювання дифузійних процесів при ПА напиленних покриттів і їх залежність від пористості.....	228
4.7 Висновки до розділу 4.....	231
Розділ 5 Дослідження впливу комбінованого методу формування багатофункціональних покриттів на комплекс властивостей відновлюваних поверхонь. Оптимізація процесу відновлення.....	234
5.1 Дослідження і розрахунково – експериментальне визначення адгезійної міцності відновлених деталей та її залежності від параметрів комбінованого способу відновлення.....	234
5.1.1 Аналіз стану існуючих теоретичних підходів оцінки адгезійної міцності. Застосування існуючих гіпотез і теорій адгезії для вирішення проблем надійності ЗТ та їх елементів.....	237
5.1.2 Фізичні основи адгезійної міцності.....	240
5.1.3 Використання дифузійної теорії адгезії в отриманні багатофункціональних покриттів комбінованим способом.....	246
5.1.4 Аналіз існуючих методів і методик визначення адгезійної міцності покриттів їх недоліки і переваги. Рекомендації по вибору способу випробувань на адгезійну міцність.....	251
5.1.5 Визначення адгезійної міцності системи «покриття-відновлювана» поверхня розрахунково – експериментальною методикою.....	256
5.1.6 Визначення впливу параметрів комбінованого методу відновлення на адгезійну міцність покриттів.....	260
5.2 Дослідження впливу на адгезійну міцність системи «відновлена поверхня – покриття» залишкових напружень. Визначення залишкових напружень в покриттях методом графічного диференціювання.....	263
5.3 Вплив матеріалу покриття на фазово – структурні перетворення і управління ними для забезпечення підвищення твердості і зносостійкості відновлюваних поверхонь.....	270

5.4 Дослідження залежності мікротвердості відновлених поверхонь деталей ЗТ від режимів ПА.....	279
5.5 Визначення оптимальних режимів відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів....	287
5.6 Висновки до розділу 5.....	292
Розділ 6 Дослідження властивостей поверхонь відновлених комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. Розробка дослідно – експериментальної технології та технологічних інструкцій для відновлення деталей ЗТ комбінованим способом.....	295
6.1 Дослідження зносостійкості і межі витривалості відновлених поверхонь.....	295
6.2 Дослідження корозійної стійкості відновлених поверхонь з покриттями.....	300
6.3 Розробка ТП дослідно – експериментальної технології відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.....	304
6.3.1 Загальні положення про ТП ремонту ЗТ	304
6.3.2 Загальна схема дослідно – експериментальної технології відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.....	306
6.3.3 Обробка відновлюваних поверхонь під напилення ЕІЛ.....	307
6.3.4 Нанесення ЕДН – покриттів з дротяних сталей.....	308
6.3.5 Обробка поверхонь, відновлених ЕДН – покриттями, ПА....	313
6.3.6 Механічна обробка поверхонь деталей ЗТ.....	315
6.3.6 Рекомендації по організації ділянки відновлення.....	317
6.4 Технологічні інструкції щодо використання дослідно – експериментальної технології для відновлення розподільного валу 150.03.022-1 ДГ 6ЧН 12/14 і валу Н13.550.51.150-03 СН ВКС 2/266.....	320
6.4.1 Характеристика дизель – генератора і його деталей які підлягають відновленню, для реалізації проведених досліджень і розробки методу підвищення їх ресурсу на основі комбінованої технології.....	320

6.5 Висновки до розділу 6.....	335
Висновки.....	338
Список використаних джерел.....	341
Додаток А Відомості щодо впровадження результатів роботи.....	390
Додаток Б Види впливів, руйнівні процеси, експлуатаційні відмови і пошкодження ЗТ. Методи відновлення деталей ЗТ.....	395
Додаток В Сучасні апарати для нанесення покриттів.....	399
Додаток Д Характеристика обладнання, що використовується для напилення.....	400
Додаток Е Матеріали для відновлення.....	405
Додаток Ж Принципова електрична і структурна схеми установки «Елітрон-22» для ЕІЛ і конструкції електромагнітних збудників.....	408
Додаток З Вимоги до обладнання для ПА. Основні технічні дані та принципова схема установки.....	412
Додаток И Результати дослідження властивостей відновлених поверхонь.....	415
Додаток К Розрахунок оптимальних параметрів комбінованого методу відновлення робочих поверхонь деталей ЗТ.....	418
Додаток Л Практичні рекомендації з відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів. Технологічна інструкція процесу відновлення розподільного валу комбінованим методом (на прикладі дизель-генератора 6ЧН 12/14.....	423
Додаток М. Патент, який засвідчує право інтелектуальної власності.....	448
Додаток Н. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	449

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ЕДН – апарат – апарат для електродугового напилення
- ГТН – газотермічне напилення
- ГПН – газополуменеве напилення
- ГТН – покриття – газотермічні покриття
- ДВЗ – двигуни внутрішнього згорання
- ЕДН – електродугове напилення
- ЕДН – покриття – покриття, отримані електродуговим напиленням
- ЕКО – електроконтактна обробка
- ЕКПП – електроконтактне припікання порошків
- ЕІЛ – електроіскрове легування
- ЕМО – електромеханічна обробка
- ЕПО – електронно – променева обробка
- ЕШН – електрошлакове наплавлення
- ЗЗП – зміцнюючі захисні покриття
- ЗП – зміцнюючі покриття
- ЗТ – засоби транспорту
- ЗТВ – зона термічного впливу
- ІА – іонне азотування
- ІА – іонно імпульсне азотування
- ІІ – іонна імплантація
- КВМ – коефіцієнт використання матеріалу
- КЕ – конструктивний елемент
- КЕА – кінцево – елементний аналіз
- КЕП – композиційні електролітичні покриття
- КЕС – кінцево-елементна сітка
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- КЛР – коефіцієнт лінійного розширення
- КМ – композиційні матеріали

КТР – коефіцієнт термічного розширення
ЛО – лазерна обробка
ЛЛ – лазерне легування
МДО – мікродугове оксидування
МО – механічна обробка
МТО – механо – термічна обробка
МТЗО – механо – термічна зміцнююча обробка
МЕП – міжелектродний проміжок
МСЕ – метод скінчених елементів
НДС – напружено – деформований стан
НТП – норми технічних параметрів
ПММ – паливно – мастильні матеріали
ППД – поверхнєве пластичне деформування
ПЗ – поверхнєве зміцнення
ПЗО – поверхнєва зміцнююча обробка
ППП – пакет прикладних програм
РЕПН – реактивне електронно – плазмове напилення
ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт
СВЧ – струми високої частоти
СДГ – судновий дизельний двигун
СФС – самофлюсуючі сплави
СФП – структурно – фазові перетворення
УЗО – ультразвукова обробка
ТМО – термомеханічна обробка
ТО – термообробка
ТП – технологічний процес
ТЦ ІА – термоциклічне іонне азотування
ХТО – хіміко – термічна обробка
ФМІ – Фізико – механічний інститут НАН України
ФТО – фізико – термічна обробка

ВСТУП

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 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 (ІПМіц) імені Г.С. Писаренко НАН України за темами: «Аналіз, класифікація методів і обґрунтування можливості використання ремонтних технологій для відновлення працездатності елементів конструкцій на різних стадіях пошкодження» (№ Р8.10); «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (№ 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 ЗТ 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 ЗТ та їх елементів;

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

– визначити вплив режиму 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 ЗТ 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 зав'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 ЗТ в процесі їх ремонту, яка враховує структурні та морфологічні особливості відновлюваної поверхні після ЕІЛ, вплив параметрів ЕДН на якість системи «покриття – відновлювана поверхня» та модифікуючу дію ПА покриттів, що отримані напиленням;

– розроблений комбінований спосіб отримання багатофункціональних покриттів, що включає ЕІЛ, ЕДН і ПА. Обґрунтована доцільність методу ЕІЛ для підвищення адгезійної міцності напилених покриттів, підтверджена необхідність ЕДН струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші для отримання щільних покриттів з високою міцністю зчеплення та їх обробка ПА для підвищення твердості і зносостійкості відновлюваних поверхонь, що дозволить забезпечити високі експлуатаційні властивості і надійність деталей ЗТ;

– визначено вплив параметрів ЕДН, 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 ЕДН, 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 ПА та ступінь їх впливу на глибину дифузії азоту, мікротвердість та зносостійкість покриттів, отриманих ЕДН;

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

Вдосконалено:

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

– метод моделювання процесу відновлювання елементів ЗТ 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 ЕІЛ, ЕДН і ПА.

Набули подальшого розвитку:

– способі підготовки відновлюваної поверхні ЕІЛ для збільшення адгезійної міцності системи «покриття – відновлювана поверхня»;

– метод підвищення мікротвердості і зносостійкості відновлених поверхонь деталей ЗТ 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 ЗТ електродуговим напиленням покриттів у частині визначення нових взаємозв'язків між експлуатаційними властивостями і надійністю відновлених деталей з напиленими покриттями з параметрами їх подальшої обробки ПА.

Практична значимість отриманих результатів. Розроблені моделі, методи, проведені 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 ХДМА на кафедрі ЕСЕУ та при викладанні дисциплін «Організація та технологія судноремонту» і «Технічне обслуговування і ремонт судових технічних засобів».

Особистий внесок здобувача. Результати роботи отримані автором особисто. Основні дослідження, описані в дисертації, були виконані автором під керівництвом наукового консультанта. Особистий внесок автора полягає у запропонованні концепції забезпечення надійності деталей ЗТ, 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. 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 ЕДН покриттів і конструкції обладнання на їх властивості шляхом використання математичного моделювання [5, 9, 23, 32, 33]; використання структурних аномалій в ГТН – покриттях для підвищення зносостійкості деталей ЗТ [8, 43]; використання теорій адгезії

при формуванні покриттів [40]; обґрунтування доцільності використання ГТН для антикорозійного захисту деталей [30]; дослідження впливу ХТО на властивості ЕДН – покриттів [36]; обґрунтування доцільності підвищення властивостей ГТН – покриттів ПА [7, 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 розподільчого валу комбінованим методом нанесення покриттів [15, 24, 26, 45]; використання ПА для зміцнення поршнів ДВЗ [42]; відновлення валів СДГ і СН комбінованою технологією [15, 24, 26, 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» (Херсон, 2015 – 2020 р.р.); «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 р.).

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 р.р.).

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 кuartилів 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗТ ТА ЇХ ПІДВИЩЕННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ В РЕМОНТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ЗЗП. СТАН ПРОБЛЕМИ.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Пріоритетним напрямком розвитку ЗТ (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення) є розширення їх можливостей шляхом вирішення проблем щодо продовження ресурсу на етапах відновлення та ремонту [50].

Однією з основних умов ефективного використання ЗТ є їх високі експлуатаційні властивості. Низькі ресурси ЗТ ускладнюють їх експлуатацію та обслуговування, приводять до змушених простоїв у зв'язку з необхідністю частих замін КЕ. Статистичні дані показують, що у зв'язку із зношенням КЕ, втомуою матеріалів, попаданням сторонніх предметів окремі деталі пошкоджуються й втрачають свою працездатність, до того ж знижуючи коефіцієнт корисної дії, економічність та надійність ЗТ.

У зв'язку з цим однією з проблем у галузі ремонту ЗТ є проблема науково – обґрунтованого вибору та впровадження в технологію ремонту перспективних та більш ефективних способів нанесення ЗЗП. Зростання актуальності цієї проблеми зумовлено посиленням умов експлуатації ЗТ, підвищенням вимог до безпеки їх експлуатації, збільшенням витрат на їх ТО та Р.

Стратегія експлуатації вітчизняного парку ЗТ показує, що на етапах їх створення (розробки та виробництва), відновлення й модернізації спостерігається неухильна тенденція впровадження нових, більш прогресивних способів, які забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей та надійності КЕ та ЗТ в цілому. У зв'язку з цим найбільшого інтересу заслуговують інтегровані, гібридні та комбіновані методи нанесення

ЗЗП на робочі поверхні КЕ ЗТ.

В розділі проведено аналіз технічного стану та експлуатації ЗТ (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення) в Україні, а також визначено вплив технологічних та експлуатаційних факторів на характеристики конструкційних матеріалів. Проведено огляд літератури, який присвячено аналізу проблеми розвитку та використання сучасних способів відновлення деталей ЗТ.

Результати аналізу дозволять:

- виявити ті проблемні питання, які в процесі ТО та Р ЗТ залишилися невирішеними, і таким чином, визначити своє місце у вирішенні вказаної проблеми;
- визначити особливості способів нанесення ЗЗП та встановити найбільш ефективний метод відновлення КЕ засобів транспорту;
- визначити об'єкт, предмет, мету та загальну схему проведення досліджень;
- поставити основні задачі дослідження.

1.1 Стратегія експлуатації вітчизняного парку ЗТ. Аналіз технічного стану та умов експлуатації ЗТ, інформаційних потоків і тенденцій ремонтного напрямку

Розвиток сучасних ЗТ (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення) пов'язаний з проблемою підвищення довговічності їх деталей, вузлів і агрегатів. Щорічно ремонтні підприємства витрачають більше 40 % металу на виготовлення запасних деталей, а в шихту здається до 300 тис. деталей при зносі поверхонь, що сполучаються, 0,5 – 2,0 мм і втраті маси 3,5 % [44, 50]. Тому, основна проблема, яка вирішується в дисертаційній роботі, – підвищення надійності ЗТ та їх елементів використанням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту.

Значне зростання цін нових ЗТ змусив по – новому підійти до стратегії їх експлуатації [44, 51, 52]. Практика експлуатації ЗТ поставила ряд проблем, серед яких однією з головних є проблема відновлення «старіючого» парку ЗТ, захист від корозії, розробка і впровадження маловитратних способів відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей їх деталей, вузлів і агрегатів [50, 53 – 60].

Аналіз інформаційних потоків та тенденцій ремонтного напрямку дозволив зробити висновок, що в даний час технологічне забезпечення ремонтного виробництва не відповідає сучасним технологічним, економічним і екологічним вимогам, викликає необхідність відбракування деталей в зв'язку з неможливістю їх відновлення [50, 61]. При цьому зростають збитки від простоїв ЗТ і перевитрати дорогих запасних деталей імпортного виробництва для заміни зношених деталей [44]. Пошук нових технічних рішень актуалізується значним подорожчанням сировини, запасних частин і агрегатів. Розвиток і впровадження нових способів відновлення деталей ЗТ стримується відсутністю науково – обґрунтованих рекомендацій, обладнання та матеріалів [50, 53, 54, 62 – 64].

Гарантом збереження парку ЗТ є удосконалення системи технічного обслуговування, створення нормативно – технічної бази технологій відновлення, ремонт наявного парку транспортних засобів [44, 50, 61, 65]. Розробка нових способів відновлення і захисту від корозії деталей вузлів і агрегатів ЗТ підвищить їх експлуатаційні властивості, надійність і довговічність [44].

Таким чином, основним напрямком підвищення експлуатаційних властивостей ЗТ є удосконалення способів відновлення їх деталей в поєднанні з використанням найбільш доступних і недорогих матеріалів та устаткування.

Проблема підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ пов'язана з необхідністю визначення їх пошкоджень і причин виходу з ладу [66 – 77]. В процесі експлуатації деталі ЗТ піддаються впливу механічних, кліматичних, і інших чинників, відчуваючи при цьому вплив середовищ, навантажень, тертя, вібрацій, ударів (додаток Б, рис. Б1). Для встановлення причин виходу їх з ладу необхідно

враховувати ефект від спільного впливу цих факторів. В результаті механічних впливів (статичних, вібраційних і ударних навантажень) протікають руйнівні процеси [67 – 76] (додаток Б, рис. Б2). Вплив кліматичних факторів (температури, вологості тощо) руйнують поверхні деталей. При зміні температури на поверхні деталі конденсується волога, яка прискорює корозію металів. Тиск впливає на режим теплообміну деталей, порушує їх герметичність. Шкідливими проявами тертя та результатом зношування – найбільш поширений вид руйнування поверхонь ЗТ (додаток Б, рис. Б3).

Для усунення несправностей і підвищення надійності ЗТ та їх елементів необхідно встановити вид зносу, механізм і характер зношування. Основними факторами, що визначають вид зносу деталей ЗТ є середовище, динаміка і кінематика відносного переміщення тіл, характер контакту, властивості матеріалу деталей ЗТ. Перші три чинники первинні і характеризують зовнішні умови експлуатації деталей, визначають кількісну та якісну сторони явищ зносу. На підставі аналізу умов експлуатації ЗТ встановлено [51, 52, 76], що до 60 % їх деталей виходять з ладу через знос і корозію, а 20 – 30 % деталей – через руйнування від втоми (рис. 1.1).

Зношування деталей ЗТ є наслідком нерівномірного розподілу навантаження, значних вібрацій, підвищених тисків, підвищеної температури, попадання сторонніх часток і продуктів зношування в зону тертя [66 – 72].



Рисунок 1.1 – Розподіл дефектів деталей ЗТ

Відмови деталей ЗТ виникають, якщо діючі навантаження перевищують допустиму межу міцності або межу плинності, а багаторазові навантаження створюють напруження, які перевищують межу витривалості і при цьому, поступове накопичення пошкоджень призводить до зародження і розвитку макротріщин. Відмови деталей ЗТ можна визначити при експлуатаційних випробуваннях, за допомогою яких можна виявити «слабкі місця» і розробити заходи щодо їх усунення.

Аналіз літературних джерел [50, 51 – 60, 62 – 64], присвячених проблемі відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ показав, що провідним питанням в ній є вивчення механізму зношування [66 – 72]. При експлуатації деталей ЗТ процеси руйнування поверхонь при терті – схопленні, фретинг – процес, корозія, втомні пошкодження [66 – 75]. Корозія спостерігається в місцях статичної взаємодії матеріалу деталі з середовищем [73]. Домінуючим процесом для деталей є втомне руйнування [74, 75]. Зовнішньою проявою втоми металів є поява і поширення тріщин, які виникають при напруженнях значно нижчих межі міцності. Втомне руйнування характерно для деталей, які тривалий час сприймають змінні контрактні навантаження. Зміна форми деталей і структури матеріалів, з яких вони виготовлені, корозія та інші фактори, які накопичуються з часом, викликають втрату працездатності деталей і поступову їх відмову в роботі [73 – 75] (додаток Б, рис. Б4, рис. Б5).

Деталі вузлів та агрегатів ЗТ на підставі аналізу розглянутих вище видів зносу умовно можна розділити на наступні групи:

- деталі, що працюють в умовах при дії сил тертя, ковзання і ударів; при газоабразивному, корозійному і високотемпературному зносі (клапани, поршні, поршневі кільця та інші);
- деталі, знос яких відбувається в результаті спільної дії пластичної деформації, абразивного та інших видів зносу (шестерні, шліцові вали і т.д.);
- деталі, що працюють в умовах втомного руйнування і одночасно піддаються механічному або хіміко – механічному зносу (колінчаті вали,

шатуни, поршневі пальці).

Знос поверхонь КЕ деталей ЗТ розподіляється наступним чином [56, 57, 76, 77]: циліндричні – 52%; конічні і сферичні – 3%; шківні – 3%; пази і канавки – 5%; різьблення – 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 найбільш часто зустрічається – знос зовнішньої циліндричної поверхні (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Розподіл поверхонь деталей ЗТ за видами зносу

Відновлювані деталі ЗТ можна згрупувати по конструктивно – технологічним ознаками (табл. 1.1) і як типові розділити на деталі типу вал, втулка, важіль, корпус, шестерня, диск і ін. [56, 57]. Різноманіття відновлюваних деталей скорочується при переході від деталей до їхніх елементів (табл. 1.2).

Узагальнюючи результати досліджень основних видів зношування деталей ЗТ зроблено висновок, що вони працюють в умовах, при яких експлуатаційні навантаження (тиск, нагрівання, дія навколишнього середовища тощо) сприймаються головним чином їх поверхневим шаром. Тому, достатньо відновлювати шляхом нанесення покриття або поверхневої обробки тільки робочі поверхні деталі, а не всю деталь.

Ефективність використання ЗТ обмежена встановленими ресурсами та строками служби [50, 56, 57].

Таблиця 1.1 – Класифікація деталей вузлів та агрегатів ЗТ по конструктивно – технологічним ознаками

№ групи	Група	Характеристика відновлювальних поверхонь	Характерні представники групи
1	Корпусні	Отвори	Блоки, корпуси
2	Дискові	Кільцеві поверхні	Диски
3	Вали	Циліндричні поверхні	Шліцьові вали, вали
4	Плоскі	Поверхні малої довжини	Пази, канавки
5	Складної конфігурації	Поверхні просторової орієнтації	Зуби шестерень

Погіршення технічного стану ЗТ виникає у зв'язку з вичерпанням термінів служби до першого ремонту і міжремонтних термінів.

Таблиця 1.2 – Конструктивні елементи деталей ЗТ і характер їх пошкоджень

Конструктивні елементи	Види навантажень	Характер пошкоджень	Відновлювані властивості
Шийки валів	Змінні моменти і сили	Знос, втомні тріщини	Зносостійкість, форма, розміри, шорсткість, втомна міцність
Торці, що труться	Осьові сили	Знос	Зносостійкість, форма, розміри, шорсткість
Отвори різьбові	Зусилля зтяжки, вібрація	Деформація, знос, руйнування	Форма, розміри, шорсткість
Різьблення зовнішні	Зусилля зтяжки, вібрація	Деформації, знос, руйнування	Форма, розміри, шорсткість
Кулачки, ексцентрики	Поперечні сили	Знос	Зносостійкість, форма, розміри, шорсткість
Шліци	Сили, нормальні до поверхонь	Знос	Зносостійкість, форма, розміри, шорсткість

Проблемою в утриманні ЗТ є постійна загроза зниження рівня їх справності внаслідок недостатнього фінансування потреб на закупівлю запасних частин, витратних матеріалів, паливно – мастильних матеріалів, відсутності договорів на науково – технічне супроводження з боку конструкторських бюро – розробників, недосконалість нормативно – правової бази щодо їх утримання. Рівень справності ЗТ не піднімається вище

42 – 43 %, [44, 57]. Тому, стан та справність ЗТ залежить від рівня фінансування та їх життєвого циклу.

Основними шляхами підтримання ЗТ у справному стані були і є: продовження ресурсу, ремонт елементів ЗТ на ремонтних підприємствах за рахунок скорочення закупівлі ЗТ. Такий стан справ приводить до необхідності в найближчий час вирішувати питання щодо розробки та впровадження заходів, які направлені на збільшення ресурсу ЗТ.

Одним із напрямків щодо підвищення ресурсу КЕ деталей вузлів і агрегатів ЗТ у цілому є необхідність впровадження в технологію ремонту, на етапах відновлення та модернізації, перспективних методів (додаток В, рис. В1). Використання нових і удосконалених методів відновлення робочих поверхонь КЕ деталей, вузлів та агрегатів ЗТ дозволяє скоротити використання запасних частин, збільшити їх ресурс і, як наслідок, підвищити надійність при збільшенні термінів експлуатації [42, 44, 53, 54]. Так, наприклад, аналіз експлуатації ЗТ різного призначення показує, що руйнування будь-якого основного елемента двигунів призводить, як правило, до втрати їх працездатності, і як наслідок – до особливої ситуації у транспорті [50]. Через відмову двигунів ЗТ відбувається до 70 % всіх транспортних подій і близько 20 % інцидентів [50]. Аналіз статистичних даних показав, що КЕ двигуна сприяють до 30 % усіх відмов і несправностей [30, 31, 50, 79]. Ці дані добре поєднуються з дослідженнями [12, 20, 30, 31, 50, 79], згідно з якими у зв'язку з несправностями двигунів зумовлено близько 30 % всіх випадків простоїв ЗТ різного призначення. Аналіз статистичних даних щодо відмов та несправностей ЗТ при проведенні капітального ремонту на ремонтних підприємствах України показав, що кожен окремий тип двигуна має властиві йому характерні відмови й несправності, що приводять до порушення працездатності тих чи інших підсистем або двигуна в цілому [10, 12, 20, 28, 30, 31, 35, 42, 44, 50 – 52, 61, 79]. Але взагалі найбільший відсоток відмов двигунів, що проявилися в експлуатації і привели до дострокового зняття двигуна з експлуатації, де

найбільші показники мають розподільчі та колінчасті вали. Тому можна зробити висновок: розподільчі та колінчасті вали визначають та обмежують ресурс двигунів ЗТ різного призначення. Це зумовлено тим, що КЕ деталей двигунів та інших деталей, вузлів та агрегатів ЗТ, окрім згину та кручення, розтягу та згину від відцентрових сил, сприймають ударний вплив абразивних частинок пилового потоку та нерівномірні теплові навантаження, а також змінні напруження від вібраційних навантажень, амплітуда та частота яких змінюється в широких межах.

Отже, підсумовуючи аналіз технічного стану та умов експлуатації ЗТ (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення), можна зробити висновки, що:

- зараз в Україні відсутній замкнений цикл виробництва деталей ЗТ, а також відсутні кошти на закупівлю нових деталей ЗТ, тому найближче майбутнє транспортної галузі пов'язане із деталями ЗТ, що підлягають відновленню;

- сучасні ЗТ є складною технічною системою, що містить багато модулів, систем, вузлів, агрегатів та окремих КЕ, які обмежують їх ресурс;

- двигуни є однією з найбільш відмово – небезпечних систем ЗТ різного призначення. У зв'язку з цим до двигунів ЗТ висуваються підвищені вимоги в експлуатації щодо надійності та безпеки;

- надійність двигунів ЗТ різного призначення в цілому визначається працездатністю їх найбільш відповідальних та навантажених конструкційних елементів, якими є розподільчі і колінчасті вали.

1.2 Оцінка впливу експлуатаційних факторів на КЕ ЗТ різного призначення

Відомо, що загальний ефект при одночасному впливі експлуатаційних факторів може бути незрівнянно вищий від дії кожного фактору окремо. Це називають явищем синергізму або неадитивністю дії [76, 77]. Силова

напруженість, теплове навантаження та пошкодження КЕ деталей ЗТ пов'язані з режимами роботи, які визначаються режимами експлуатації.

Умови експлуатаційного навантаження елементів ЗТ різного призначення характеризуються наявністю агресивного середовища, абразивних частинок у газовому потоці, одночасною дією високих статичних та динамічних навантажень, амплітуда та частота яких змінюється в значних межах, зміни температури в широкому інтервалі (теплові удари) [10, 12, 18, 20, 31, 79]. Наслідком цих складних експлуатаційних умов є втрата міцності та руйнування конструктивних елементів, що проявляється в різних формах: зношення та попадання сторонніх предметів, накопичення дефектів структури й розвиток тріщин малоциклової та багатоциклової втоми, міжкристалічна і пітингова корозія сталевих деталей та їх корозійно – втомне пошкодження та інше. Інтенсивність протікання процесів втрати міцності в поверхневому шарі в кінцевому рахунку визначає надійність і ресурс деталей ЗТ, тобто, утворення дефектів збільшує рівень вібронапружень (за рахунок появи різкого концентратора напружень) та підвищує ймовірність їх руйнування від втоми.

Аналіз даних про фактичне напрацювання двигунів більшості типів ЗТ показує, що їх середній час роботи складає більше 40 % [12, 20, 31, 80]. В умовах експлуатації у двигунів при використанні реверсу утворюється пил, основу якого складають частинки кварцу. Концентрація кварцових частинок з пилу досягає 65 – 98 % [12, 20, 31, 79]. Кількість пилу, що знаходиться в повітрі, залежить від складу ґрунту і може досягати 0,1 – 0,4 г/м³ [12, 20, 31, 79]. Дрібні абразивні частинки, що мають гострі кути та, знаходячись у потоці повітря, із силою вдаряються в поверхню металу [12, 20, 31, 66 – 72, 79]. Подряпини, борозни, вм'ятини та раковини, що утворюються в процесі абразивної ерозії на поверхні металу є початком мікротріщин верхніх шарів, які є концентраторами напружень та при багаторазовій дії, сприяють руйнуванню металу від втоми [12, 20, 31, 74, 75, 79]. Попадаючи в проточну частину двигуна абразивні частинки викликають зношення, зміну

геометричних параметрів та зниження маси матеріалу деталей двигуна, зменшення коефіцієнт корисної дії. Абразивне спрацювання може бути причиною суттєвого зниження потужності двигунів та їх ресурсу [12, 20, 31, 66 – 72, 79]. Небезпечним, також, є попадання у двигун сторонніх предметів. При зіткненні цих предметів утворюються забоїни, які погіршують характеристики міцності [12, 20, 31, 66 – 72, 79]. Це призводить до виходу двигуна з ладу або необхідності його дострокового зняття. Зменшення ймовірності попадання у двигун сторонніх предметів досягається якісною встановленням в конструкцію спеціальних захисних пристроїв [3, 80].

При утворенні корозійно – агресивного середовища виділено п'ять основних механізмів концентрування забруднень на поверхні металу [73]: утворення твердих відкладень; концентрування забруднень до небезпечного рівня в рідкій фазі, що утворилася; концентрування забруднень на оксидах металів; утворення крапель вологи на твердих частинках забруднень.

Аналізуючи вплив підвищених температур можна сказати, що вплив на міцність КЕ вузлів і агрегатів ЗТ здійснюють температурні напруження, що виникають у результаті різного значення термічного розширення. Встановлено [3, 6, 10, 12, 20, 31, 79, 80], що коливання температур та тиску двигуна приводять до виникнення температурних напружень. Ці напруження не настільки високі, щоб викликати руйнування КЕ деталей двигуна, але можуть привести до їх руйнування через термічну втоми. Також, при впливі підвищених температур необхідно враховувати, що основні характеристики матеріалів деталей помітно реагують на зміну температури. При тривалому впливі температури властивості матеріалів змінюються в сторону крихкості (матеріал стає більш крихким), що робить його більш чутливим до концентраторів напружень [12, 20, 31, 76, 77, 79]. Крім того, внаслідок дії напружень та температур КЕ деталей змінюють свої геометричні форми і розміри, що фіксуються в процесі експлуатації. Напруження та деформації, що виникають при навантаженні деталей, змінюються в часі, навіть якщо навантаження залишаються постійними. Тому, застосування деталей вузлів і

агрегатів ЗТ із різних матеріалів обмежується наявністю підвищених температур (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Температури застосування конструктивних матеріалів

Параметр	Конструктивні матеріали		
	сталі	нікелеві сплави	титанові сплави
Температура, °С	404 – 610	610 – 640	до 404

Швидкому розвитку корозії КЕ деталей вузлів і агрегатів ЗТ сприяють умови експлуатації: різка зміна температур на протязі короткого часу, перебування в різних кліматичних зонах та стояння ТЗ на землі (корозія стояння) [73]. Це істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу: корозійні пошкодження приводять до зниження в 2 – 3 рази межі витривалості [73 – 75]. В результаті проведення капітального ремонту ЗТ різного призначення встановлено, що найбільший відсоток корозійного пошкодження мають сталеві деталі ЗТ. Корозійна стійкість матеріалів КЕ деталей визначається в основному вмістом хрому. При введенні в сталь 12 – 15 % хрому її електрохімічний потенціал стає позитивним, і вона здобуває стійкість проти корозії [17, 19, 81, 82]. Ці сталі при наявності кисню повітря легко пасивуються і на їх поверхні утворюється захисна оксидна плівка. Метал, що знаходиться в пасивному стані, практично не кородує. Але, підвищення вмісту хрому в сталі, як елементу, що утворює ферит, для збереження міцності та технологічних властивостей сталей мартенситного класу необхідно компенсувати підвищенням вмісту елементу, що утворює аустеніт: нікелю або кобальту. Підвищити вміст хрому в сталях можливо тільки при одночасному легуванні кобальтом, який не знижує температуру мартенситного перетворення. За рахунок легування сталей кобальтом вдалося підвищити в них уміст хрому до 20 % по масі. Сталі, що містять 16 – 20% хрому, володіють високою корозійною стійкістю. Але зміна стану поверхневих шарів, що проходить у процесі виготовлення деталей вузлів і агрегатів ЗТ, приводить до втрати корозійної стійкості. Відомо [42, 17, 81,

82], що вміст нікелю в сталях граничний, і його подальше підвищення приведе до різкого зниження температури мартенситного перетворення, тобто, до зниження характеристик міцності сталей.

Серед основних видів корозійного пошкодження сталевих деталей вузлів і агрегатів ЗТ пітингова корозія є найбільш небезпечною [12, 20, 51, 52, 73, 76, 79]. Пітингова корозія є основним видом електрохімічної корозії, швидкість якої тим більша, чим агресивніше атмосфера [12, 20, 51, 52, 73, 76, 79]. Це призводить до різкого зниження межі витривалості деталей, а спроби механічною обробкою, зачисткою та поліруванням, вивести пітинги в багатьох випадках закінчуються браком деталей за їх геометричними розмірами. Виникнення пітингів пов'язано з порушенням пасивного стану на окремих ділянках поверхні деталей [12, 20, 51, 52, 73, 76, 79]. На цих ділянках відбувається прискорене руйнування оксидних плівок, що викликає місцеве активування – збільшення швидкості корозії та виникнення пітингів. Такими ділянками можуть бути неметалеві включення між зерен, ділянки зі зниженою концентрацією хрому у твердому розчині. Пітинги, що утворюються в результаті корозійного пошкодження, є концентраторами напружень та можуть негативно впливати на довговічність деталей ЗТ.

Таким чином, довговічність деталей вузлів та агрегатів ТЗ визначає зносостійкість та межа витривалості матеріалу. Зі збільшенням наробітку зносостійкість і межа витривалості деталей ЗТ знижується внаслідок їх зносу, утворення концентраторів напружень у виді подряпин, забоїн, корозійних пошкоджень, впливу температури тощо. Очевидно, що деталі ЗТ потребують ефективного захисту від неадитивної дії експлуатаційних факторів.

Аналіз пошкоджень деталей вузлів та агрегатів ЗТ різного призначення дозволяє їх класифікувати (табл. 1.4).

Усе сказане дає змогу зробити висновок, що:

– в сучасних ЗТ деталі вузлів і агрегатів працюють у різних умовах експлуатації: має місце одночасний вплив середовища, температур, статичних та динамічних навантажень із широким спектром коливань;

Таблиця 1.4 – Класифікація пошкоджень КЕ деталей ЗТ

Признак	Варіанти
Тип пошкодження	Корозійний, абразивний, статичний і динамічний.
Вид пошкодження	Повне руйнування, макротріщини, мікротріщини
Причини, що викликали утворення пошкоджень	<p><u>Конструктивні</u>: недоліки конструкції, що викликають підвищений рівень напружень і температур. Неправильний вибір матеріалів і (або) вимог до них; теж саме і для покриттів.</p> <p><u>Технологічні</u>: недоліки технології механічної обробки, гарячої обробки, контролю деталей згідно креслення, недоліки ТП нанесення покриттів.</p> <p><u>Виробничі</u>: відхилення від вимог креслення деталі щодо геометрії, відхилення за якістю матеріалу, неякісне виготовлення конструктивних елементів, що можуть впливати на рівень динамічних та статичних напружень в деталях.</p> <p><u>Експлуатаційні</u>: порушення режимів експлуатації, що регламентовані ТУ; попадання сторонніх предметів у вузол або агрегат; наявність агресивного середовища.</p>
Ступінь впливу на безпеку подальшої експлуатації	Не впливає на ресурс Обмежує термін подальшої експлуатації Вимагає термінової заміни деталей

- в результаті неадитивної дії експлуатаційних факторів проходить втрата міцності та втрата властивостей конструкційних матеріалів, деталей ЗТ;
- одним з основних видів руйнування конструктивних елементів деталей вузлів та агрегатів ЗТ є руйнування від зносу та втоми;
- в більшості випадків руйнування КЕ деталей ЗТ починається з поверхневих дефектів. Ці дефекти є концентраторами напруження і можуть приводити до зносу та втомного руйнування КЕ деталей ЗТ навіть у тих перетинах, де навантаження, звичайно, невеликі;
- комплексом факторів, який визначає надійність ЗТ різного призначення є раціональний вибір конструкції деталей та їх матеріалу, врахування зміни характеристик міцності, що базуються на особливостях експлуатації ЗТ.

На рис. 1.3 представлена структурна модель конструктивних і виробничих дефектів та експлуатаційних пошкоджень КЕ деталей ЗТ.

Джерела внутрішніх та зовнішніх впливів механічного походження					
Підшипникові вузли кочення	Зубчасті передачі	Вали і їх сполюки	Похибки складання і монтажу вузлів ЗТ	Динамічні властивості ЗТ	Зовнішні сили
Похибки виготовлення підшипників	Накладання зубів	Дисбаланс	Дисбаланс	Розподіл власних частот деталей в зборі	Навантажувальні режими
Відхилення форми бігових доріжок колії підшипника	Відхилення розміру і форми зубів	Зазори в опорах валів	Зміна форми бігових доріжок кілець	Жорсткісні характеристики валів, корпусів, з'єднань	Швидкісні режими
Відхилення форми тіл кочення	Помилка зчеплення	Неспівовісність валів	Пошкодження бігових доріжок і тіл кочення		Кліматичні умови
Різний розмір тіл кочення	Радіальне биття	Вигин валів	Перекося підшипників при монтажі	Демпфуючі	Характеристика силового впливу
Похибка сепаратора		Овальності шийок валів	Зсув зовнішнього кільця підшипника	Резонансна чутливість елементів і конструкції до зміни внутрішніх і зовнішніх збурень	Пульсація крутного моменту
Похибка виготовлення посадочних місць підшипника	Бічний зазор між зубами шестерень	Неоднакові моменти інерції перетину валів	Вигин валу		Пульсація навантаження, пуск, гальмування, реверс, характер «відбору» потужності
Відхилення форми посадочних місць валу і корпусу підшипникового вузла	Відхилення осьової відстані між валами шестерень	Дефекти з'єднань валів муфтами	Перекося в сполученні зубчастих передач		
Перекося кілець через неспівовісність посадочних місць, неперпендикулярності валів, корпусів	Непаралельність зубів	Характер посадок деталей на вал	Створення напруження в елементах і з'єднаннях	Податливість і опірність згину і крутильним коливанням, змінному навантаженню	Якість енергоносіїв, мастила
Похибки збирання підшипникових вузлів	Інерційно- жорсткісні параметри шестерень валів		Порушення нормативних зазорів і натягів в сполученнях елементів		

Рисунок 1.3 – Структурна модель дефектів та експлуатаційних пошкоджень КЕ деталей ЗТ

1.3 Конструктивні матеріали для деталей вузлів та агрегатів ЗТ

Деталі вузлів та агрегатів транспортних засобів характеризуються різноманітністю конструкцій, великим діапазоном розмірів та широкою номенклатурою матеріалів, що застосовуються. У зв'язку з умовами роботи вузли та агрегати ЗТ засобів повинні мати високий ресурс та надійність, так як на КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ під час експлуатації впливають значні знакозмінні та циклічні навантаження, а діючі відцентрові та газові сили викликають великі напруження розтягу, кручення та згину [10, 12, 18, 20, 21, 28, 31, 40, 66, 68, 74 – 77, 78, 79, 80].

Матеріал деталей вузлів та агрегатів ЗТ повинен:

- володіти достатньою зносостійкістю, витривалістю, міцністю при робочих температурах і можливо меншою чутливістю до концентраторів напружень;

- бути однорідним по якості та властивостями, а саме, за характеристиками зносостійкості та витривалості;

- володіти високими вібраційними характеристиками для запобігання виникнення небезпечних резонансних коливань;

- бути достатньо технологічними, що допускає їх масове виробництво.

Вимоги до матеріалів деталей вузлів та агрегатів ЗТ знаходиться в прямій залежності від їх конструкції та призначення [50]. Деталі вузлів та агрегатів ЗТ виготовляють із наступних матеріалів: сталі (40Х13; 30ХГСА; 1Х17Н2; 15Х16Н22М; ХН30ВМТ; 14Х17Н2; 12Х18Н9 та ін.); композиційні матеріали та інші (рис. 1.4) [16, 17, 19, 27, 81, 82, 83]. Прогнози та експертні оцінки підтверджують перспективу в поступовому зростанні використання КМ у якості КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ [16, 82].

Зараз у ЗТ різного призначення спостерігається поступове впровадження КМ [16, 27]. Західні виробники двигунів General Electric, Pratt and Whitney, Rolls-Royce та інші розглядають різноманітні полімери, метали та кераміку з метою їх впровадження в конструкції двигунів для зменшення

маси та підвищення їх характеристик [44]. Діапазон композитів, що використовуються при виготовленні деталей вузлів та агрегатів ЗТ, включає пластики та полімери та металеві матриці, що армовані волокнами на основі вуглецю, графіту, карбїду кремнію [44].

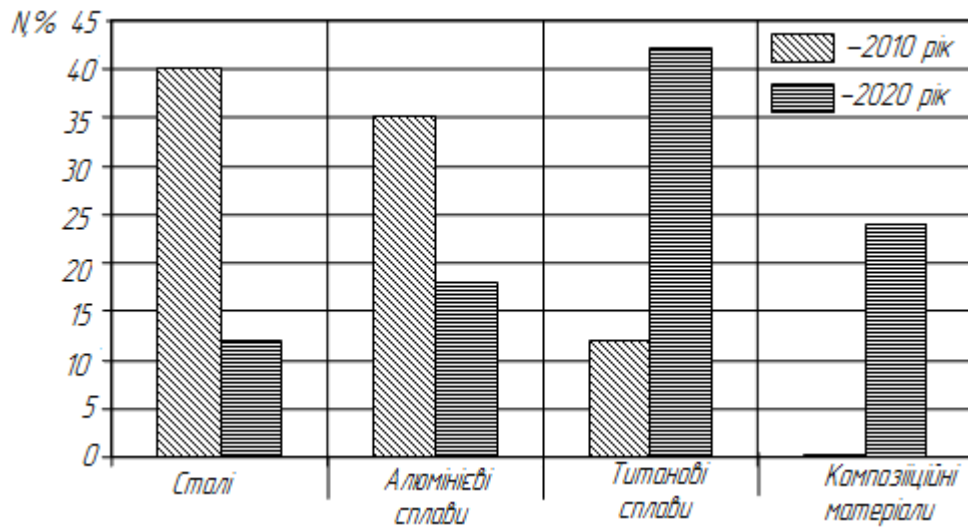


Рисунок 1.4 – Використання основних матеріалів у конструкції деталей ЗТ

Композиційні матеріали зберігають свої критичні властивості при температурах у діапазоні від криогенних температур до 315⁰С до 482⁰С [17, 81, 82]. Надійна робота деталей вузлів та агрегатів ЗТ із шаруватих КМ залежить від точності побудови кожного шару та структури армування, яка повністю забезпечує сприйняття діючих навантажень [17, 81, 82]. Однак, підвищення експлуатаційних властивостей та ресурсу ЗТ, що пов'язано з використанням КМ, широкого розповсюдження не отримало із – за їх великої вартості, складності виготовлення КЕ, зниження коефіцієнту запасу міцності при одночасному впливі теплових змін та вібрацій на $\geq 20\%$, недостатньому опору абразивним частинкам, що містяться в повітряному потоці [17, 81, 82].

Найбільш цінними конструкційними матеріалами для деталей вузлів та агрегатів ЗТ є леговані сталі, що поєднують у собі важливі експлуатаційні якості: високу зносостійкість, витривалість, достатню міцність при підвищених температурах та ін. [19, 16, 27]. Таким чином, конструкційна

міцність та надійність ТЗ залежить від властивостей матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей їх вузлів та агрегатів.

1.4 Вимоги до ЗЗП, характеристика та вибір методів їх формування на КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ

Експлуатаційні властивості, надійність, ресурс ЗТ залежить не тільки від матеріалу (хімічного складу, структури), конструктивної форми й розмірів деталей їх вузлів та агрегатів, але й у більшій мірі від способу їх виготовлення, відновлення, ремонту. Фізико – механічний стан поверхневого шару КЕ деталей ЗТ (структура, твердість, шорсткість, залишкові напруження та ін.) має значний вплив на характеристики міцності.

В останні роки вирішення проблеми підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ у цілому, все тісніше пов'язується з розвитком способів нанесення ЗЗП. Вибір ЗЗП для деталей ЗТ проводиться за таким основним показником, як за величиною зносу [16, 27, 57, 83 – 86]. Одна для правильного вибору складу та способу формування захисного шару для деталей вузлів та агрегатів ЗТ цього критерію недостатньо. Необхідно розглядати ще конструктивно – технологічні вимоги, що пов'язані із процесом експлуатації ЗТ в цілому. Не можна, створюючи ЗЗП для деталей ЗТ, знижувати надійність роботи решти його вузлів. Тому, ЗЗП на КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ різного призначення повинні відповідати наступним вимогам [57, 83, 85, 86]:

- недопустимо в склад покриття включати елементи, які можуть викликати катастрофічне окислення й утворення тріщин на деталях;
- в поверхневих шарах покриття повинно бути створено стискуючі напруження, які сприятливо впливають на межу втоми;
- покриття повинне мати достатню адгезійну міцність зчеплення з основою матеріалу деталей;
- у процесі відновлення покриття не повинні ускладнювати існуючу

технологію дефектації деталей та повинні видалятися за простою технологією.

Задача вибору способу відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення

ЗЗП – складна техніко – економічна задача. Вирішення проблеми поліпшення експлуатаційних властивостей ЗТ, може здійснюватися, як за рахунок застосування вже існуючих методів відновлення, шляхом нанесення покриттів на КЕ їх деталей, так і за рахунок їхнього удосконалення.

Відомо понад 130 методів нанесення багатофункціональних покриттів (захисних, корозійностійких, антифрикційних, тощо.), що відрізняються фізичними, механічними, хімічними й багатоопераційними способами утворення [16, 27, 83, 85 – 90]. У зв'язку з цим виникає необхідність систематизації й класифікації методів нанесення багатофункціональних покриттів за наступною схемою [91 – 94]:

- механічні методи (методи, що базуються на пластичній деформації, наприклад, відновлення ультразвуком, вигладжуванням, обкаткою роликками та ін.) [57, 95, 96];

- методи фізико – хімічного модифікування матеріалу поверхневого шару (ЛО [57, 97, 98], П [57, 83], ХТО [57, 99], азотування та ін.) [57, 100];

- методи нанесення покриттів (наприклад: методи ГТН [101 – 120] – детонаційне [9, 57, 136 – 157], ГПН [9, 158 – 161]; плазмове напилення [162 – 166], ЕДН [16, 27, 82, – 155], наплавлення під шаром флюсу [11, 155], електродугове і плазмове наплавлення [78, 122 – 124], електроконтактне наварювання [9, 158], ЕКПП [159], гальванічні покриття [160 – 162], ЕІЛ [163 – 165], та ін.;

- комбіновані, гібридні, інтегровані методи [25, 166 – 172].

На вибір методу нанесення ЗЗП впливають наступні фактори [91 – 94]: властивості матеріалу ЗЗП; обмеження, що вносяться матеріалом деталі, що відновлюється, (наприклад, максимально допустима температура нагрівання деталі); величина міцності зчеплення ЗЗП із відновлюваною поверхнею; необхідне обладнання та засоби технічного забезпечення способу

відновлення; вартість, доступність (дефіцитність) матеріалів, екологічні аспекти.

При виборі та реалізації способу нанесення ЗЗП в процесі відновлення деталей ЗТ необхідно враховувати наступні фактори: деталь повинна бути технологічною (необхідно враховувати швидкість технологічного освоєння та економічні аспекти); експлуатаційні умови (вплив навантаження та корозійного середовища, ресурс, ремонтпридатність); забезпечення надійності способу нанесення ЗЗП на всіх його етапах (від стадії проектування до стабільного функціонування технологічного обладнання); управління властивостями поверхневого шару відновлюваної деталі з покриттям за критеріями міцності [83]. Усе це необхідно забезпечити при мінімальних енерговитратах і матеріальних ресурсах.

При виборі та проектуванні способів відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів, необхідно враховувати вплив способу їх нанесення на експлуатаційні властивості відновлюваних поверхонь КЕ ЗТ.

1.5 Оцінка стану проблеми підвищення експлуатаційних властивостей ЗТ на основі використання в ремонтних технологіях ЗЗП

Всі методи ремонту деталей вузлів та агрегатів ЗТ можна поділити на способи відновлення поверхневого шару їх КЕ, які пов'язані зі зміною його хімічного складу, структури, мікрогеометрії, з утворенням ЗЗП [57, 83, 89, 90]. Відновлення шляхом створення ЗЗП на поверхні реалізується:

- електронно – променевим і електроіскровим способом [163, 164, 173];
- наплавленням (газовим полум'ям, електричною дугою, плазмою, під шаром флюсу, електроконтактним, вібродуговим тощо) [113, 155 – 157, 176];
- ГТН (ГПН, детонаційним, ЕДН, плазмовим) [130 – 155];
- комбінованими методами, які об'єднують методи нанесення покриттів з методами модифікації поверхні ЕІЛ з вигладжуванням, ГТН з ЛО,

наплавлення з ППД і т.д.) [169, 172, 175, 178 – 184].

Модифікування поверхневого шару може здійснюватися ППД, ТО, дифузійним насиченням легуючими елементами [95, 96, 169, 172, 177].

Застосування покриттів пов'язують з реалізацією принципово нового підходу до створення матеріалів: міцність і несуча здатність деталі забезпечується за рахунок матеріалу основи, а опір зміцненню, впливу від корозії, зношування та ін. факторів підвищується за рахунок нанесення ЗЗП [83]. При нанесенні покриттів відновлення КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ досягається шляхом осадження на їх поверхні матеріалів, які за своїми властивостями відрізняються від матеріалу деталі і найбільш повно відповідають умовам експлуатації (знос, корозія, хімічний вплив тощо). Використання покриттів дозволяє збільшити термін експлуатації ЗТ шляхом підвищення зносу – і корозійної стійкості їх деталей і зменшити витрати легованих сталей і сплавів [27, 49, 185 – 189]. Багатофункціональні покриття [89, 90], надають поверхні корозійну стійкість, зносостійкість, специфічні експлуатаційні властивості (електричні, оптичні, антифрикційні тощо). Покриття є перспективним способом захисту від поширюваного впливу високих теплових потоків і агресивних середовищ [83].

Розробка і використання ЗЗП можна об'єднати терміном «Surface Engineering» [83, 89, 90, 163, 169]. Різноманіття способів нанесення покриттів [83] пояснюється тим, що жоден з них не може претендувати на універсальність: один і той же метод в одних умовах експлуатації може дати позитивний ефект, а в інших негативний; кожен спосіб має свою область застосування; один і той же матеріал покриття може бути завдано різними способами; більшість способів можна розглядати як альтернативні [83]. Нанесенням покриттів не вдається отримати одночасно підвищення всіх експлуатаційних властивостей деталі для всіх режимів експлуатації. Один і той же матеріал покриття, але нанесений різними способами, показує різні експлуатаційні властивості. Велика кількість альтернативних варіантів технологій нанесення ЗЗП вимагають вибору найбільш оптимального

способу відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей вузлів та агрегатів ЗТ [91 – 94].

На ремонтних підприємствах знайшли застосування методи нанесення покриттів електродуговим і вібродуговим наплавленням, наплавленням в середовищі вуглецевого газу та під шаром флюсу, ГТН [16, 27, 88, 113].

Хромування [190] застосовують для відновлення і підвищення зносостійкості робочих поверхонь поршневих кілець і пальців, гільз циліндрів, шийок колінчастих валів, зубів черв'ячних шестерень. Залізненням відновлюють циліндричні поверхні штовхачів, клапанів, шийок розподільчих валів, валиків масляних і водяних насосів. Хромування і залізнення – способи електролітичного нарощування металу, до переваг яких слід віднести: відсутність термічного впливу на основний метал і відновлення одночасно великої кількості деталей, а до недоліків – низьку продуктивність і зниження втомної міцності [191, 192].

Альтернатива хромуванню – гальванічні покриття [160 – 162]. Недоліки гальванічних покриттів – зниження межі витривалості деталей, недостатня товщина покриттів і складність їх нанесення на окремі ділянки деталі, низька продуктивність, необхідність у великих виробничих площах і екологічний збиток через токсичні відходи.

Для відновлення локальних зон застосовують ЛО [97, 98], ЕПО [173 – 175] і МДО [193 – 195]. ТО [196, 197] і ХТО [99] використовують для підвищення твердості і зносостійкості деталей, але вона не забезпечує збільшення їх розмірів.

Електрофізичні способи обробки [198, 209] застосовують для легування поверхонь. Серед цих способів найбільший інтерес викликає ЕІЛ [162, 165].

Там, де дозволяє конструкція деталі, застосовують технології відновлення методами ППД [95, 96] (правкою, роздачою, осадкою, обтисненням, витягуванням, накочуванням, наклепом тощо). ППД застосовується для усунення деформацій (вигину, викривлення тощо) деталей, відновлення їх розмірів і форми. Роздачою відновлюють розміри

зовнішніх поверхонь порожнистих деталей (піввісь, шийок під кільця підшипників), осадкою – піввісь, штовхачі клапанів, втулки шатунів, обтисненням – втулки з кольорових металів, отвори важелів. Для відновлення деталей ЗТ з місцевим зносом (шліци, шестерні, посадочні місця підшипників) застосовують видавлювання і висадку.

Електро механічний спосіб використовується для відновлення розмірів зношених поверхонь та їх розмірно – чистової обробки (шийки валів із зносом до 0,3 мм) [200 – 202]. Електро механічне вигладжування дозволяє отримати шорсткість поверхні R_a в межах 0,16 – 0,63 мкм, підвищувати міцність від втоми і зносостійкість деталей на 20 – 50 %.

Зварювання – найбільш поширений спосіб відновлення деталей, який служить для відновлення деталей з тріщинами, пробоїнами, раковинами від корозії [27, 203 – 208]. Вибір способу відновлення деталей вузлів та агрегатів ЗТ зварюванням обумовлений матеріалом деталей, їх конструкцією, розмірами відновлюваних поверхонь. За допомогою зварювання плавленням усувають тріщини, знос отворів, відколи, пробоїни. Широко застосовуються електродугове і газове зварювання, на частку яких припадає 35 – 65 % загальної трудомісткості зварювальних робіт. Контактні методи зварювання використовуються для приварки накладок і при закладенні тріщин, приварювання елементів і частин, що компенсують знос деталей.

Широко застосовуються газове, електродугове і вібродугове наплавлення, наплавлення під шаром флюсу та в середовищі захисних газів (табл. 1.5) [111, 155, 176, 177]. Наплавлення – нанесення шару розплавленого металу шляхом плавлення присадочного матеріалу теплотою газового полум'я, електричної або плазмової дуги [113, 155]. Наплавлення складає 77 % загального обсягу робіт з нанесення покриттів: наплавлення під шаром флюсу – 31 %, вібродугова – 11 %, в середовищі захисних газів – 16 %, плазмова – 14 %, електрошлакова – 3 % [113, 155].

Електродуговим наплавленням відновлюють поверхні з великими величинами зносів шляхом плавлення матеріалу, що наноситься і

поверхневого шару деталі. При електродугової наплавленні покриття має високу щільність і міцність зчеплення [113, 155, 156, 176]. Недоліки електродугового наплавлення – деформування деталі внаслідок істотного термічного впливу і трудомісткість механічної обробки (МО).

Таблиця 1.5 - Характеристика основних технологічних схеми наплавлення

Способи наплавлення	Зона термічного впливу, мм	Продуктивність, см/хв	Міцність зчеплення, МПа
Під шаром флюсу	2,7 – 6,0	50 – 80	180 – 250
У середовищі CO ₂	2,5 – 3,7	70 – 90	80 – 120
Газова	1,8 – 3,2	20 – 45	100 – 150
Електроконтактна	0,1 – 0,3	до 100	150 – 200
Плазмова	0,3 – 0,5	50 – 70	200 – 250
Вібродугова	0,5 – 2	35 – 36	160 – 180

Процес відновлення зношених поверхонь габаритних деталей ЕШН складається в створенні ванни розплавленого шлаку, в який подається електродний дріт [113, 155].

При індукційному наплавленні на поверхню відновлюваної деталі наноситься шар сплаву у вигляді обмазки або шихти, який розплавляється СВЧ [210, 211]. При наплавленні в середовищі вуглекислого газу немає необхідності в очищенні наплавленого металу від шлаку, однак мають місце втрати металу на розбризування і необхідність в очищенні газового сопла від розбризаного металу.

Наплавлення під шаром флюсу застосовується для відповідальних деталей ЗТ, що працюють в умовах динамічного навантаження (вали, півосі та ін.). При цьому виді наплавлення відсутні втрати на розбризування і чад, зменшується витрата електродного матеріалу, зона дуги і розплавленого металу захищена від впливу кисню повітря. Недоліки цього виду наплавлення: нерівномірність властивостей і відсутність можливості отримання покриття товщиною менше 1,5 мм [113, 155].

Вібродугове наплавлення використовується для відновлення шийоквалів. При вібродуговому наплавленні хімічний склад і властивості деталі не змінюються, так як ЗТВ невелика. Охолоджуюча рідина сприяє отриманню загартованого наплавленого шару з високою твердістю і зносостійкістю. Однак пори і оксиди в наплавленому шарі знижують міцність від утоми відновлених деталей [113, 155].

Перспективним способом нанесення покриттів і відновлення деталей є плазмове наплавлення, заснована на використанні тепла плазмового струменя [157]. Переваги процесу – незначна глибина проплавлення основного металу, можливість наплавлення тонких шарів, висока якість наплавленого металу. В даний час для зміцнення і відновлення деталей застосовується електроконтактне наплавлення [177, 209].

Незважаючи на різноманіття технологічних схем наплавлення більшість з них не забезпечує формування бездефектної структури наплавленого шару через великі тепловиділення в деталь. При наплавленні на 20 – 30% губляться вихідні позитивні властивості матеріалів (твердість і зносостійкість), що пов'язано з нагріванням матеріалу покриття до температур, що перевищують його температуру плавлення. Головним недоліком методів наплавлення залишаються «холодні» і «гарячі» тріщини в ЗТВ, які різко знижують експлуатаційні властивості відновлених деталей. Наплавлення покриттів великої товщини вимагає зняття значних припусків при МО.

Недоліків наплавлення позбавлені способи наварки – нанесення покриттів з застосуванням зварювання тиском [9, 158]. Електроконтактне наварювання дроту (стрічки) відрізняється високою продуктивністю, мінімальними втратами матеріалу для присадки, здійснюється спільним деформуванням металу, що заварюється, і металу деталі при нагріванні її короткими імпульсами (0,02 – 0,16 с) струму силою 7 – 30 кА. Найбільш часто цей спосіб використовується для відновлення посадочних місць під підшипники на валах.

З різноманіття способів нанесення ЗЗП найбільш масовими, що використовуються при відновленні та підвищенні експлуатаційних властивостей деталей ЗТ, є методи ГТН [101 – 120]. Сутність ГТН полягає в наступному: метал у вигляді дроту або порошку подається в спеціальний апарат; на виході з нього розплавляється і розпилюється струменем стисненого повітря або інертних газів; осідає на підготовлену поверхню деталі при ударному зіткненні з цією поверхнею [101 – 120].

До методів ГТН відносяться: плазмове [130 – 135], детонаційне [121 – 125], ГПН [125 – 129] і ЕДН [45, 136 – 155] напилення (табл. 1.6). Загальним для всіх цих методів є нагрівання матеріалу, що розпилюється до пластичного стану або плавлення, прискорення частинок або крапель газовим потоком і подальша взаємодія частинок з відновлюваною поверхнею.

Таблиця 1.6 - Характеристика методів ГТН

Параметр	Спосіб напилення			
	ГПН	Плазмовий	Детонаційний	ЕДН
Продуктивність, кг/год	1 ÷ 10	0,5 ÷ 8,0	0,1 ÷ 6,0	3 ÷ 36
Коефіцієнт використання матеріалу	0,8 ÷ 0,95	0,7 ÷ 0,9	0,3 ÷ 0,6	0,8 ÷ 0,95
Температура частинок, що розпилюються, К	до 2000	до 3000	до 3000	до 2000
Швидкість частинок, що розпилюються, м/с	20 ÷ 180	50 ÷ 600	350 ÷ 1000	50 ÷ 240
Температура нагрівання деталі, °С	100 ÷ 150	150 ÷ 200	100 ÷ 150	100 ÷ 150
Міцність зчеплення, МПа	до 50	до 120	до 200	до 40
Пористість, %	16,0 ÷ 35,0	3,0 ÷ 4,0	0,5 ÷ 1,0	10,0 ÷ 30,0

Основними параметрами напилення покриттів, що визначають їх якість, є міцність зчеплення з поверхнею деталі і щільність шару, які залежать від складу і властивостей робочого газу, що використовується характеристик відновлюваної поверхні деталі і режимів роботи обладнання.

Способи ГТН мають ряд переваг [101 – 120]: нанесення матеріалів різного складу, отримання покриттів із заданими властивостями, керованість

процесів, здійснення напилення в різних умовах (багатосерійне виробництво, майстерні, польові умови); висока продуктивність (від 1 до 100 кг/год); відсутність деформації деталей (температура не перевищує 150 – 200 °С); простота обладнання, нанесення покриттів на локальні ділянки поверхні деталей будь – якої форми і на великі площі товщиною від 0,03 мм до декількох міліметрів. Наявність вітчизняних та зарубіжних установок ГТН, матеріалів для напилення та розроблені рекомендації дали можливість вирішувати ряд питань по відновленню і підвищенню експлуатаційних властивостей деталей ЗТ [101 – 120]. За допомогою ГТН можна відновлювати плоскі, зовнішні і внутрішні циліндричні поверхні, включаючи такі складні, як колінчасті вали [105, 112, 118 – 120, 45, 139 – 141, 143, 145, 151]. На сьогоднішній день розроблені методи відновлення деталей ЗТ, водяного і паливного насосів тощо. (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Відомості по зносу і відновленню ряду деталей ЗТ

Найменування деталей	Матеріал	Знос	Спосіб відновлення, матеріал
Втулка циліндра дизеля	СЧ 25	Кавітаційна ерозія, раковини, ерозія посадочних місць	Плазмове напилення посадочних місць ніхромом, нерж. сталлю
Палець поршня	Сталь 20Х	Стирання до 0,08 – 0,1 мм, окремі риски глибиною до 0,2 мм.	Напилення СФС Електролітичне хромування
Колінчастий вал	Сталь 45	Биття шатунних шийок 0,5 – 1,0 мм, риски, забоїни, корозія, знос до 0,2 – 0,4 мм	Напилення шийок валів, ПХ20Н80
Розподільний вал	Сталь 20Х	Стирання кулачків до 0,4 мм; вищерблення до 1мм	Плазмове напилення або ГТН СФС-покриттів системи Ni – Cr – В – Si
Вал паливного насосу	Сталь І2ХН3А	Знос поверхні кулачка і цапфи до 0,5 – 0,6 мм	Плазмове напилення або ГТН СФС-покриттів системи Ni – Cr – В – Si
Корпус водяного насосу	Бронза 03Ц7С5Н1	Стирання бічної і торцевої поверхні камери на глибину до 0,6 – 1,5мм	ГТН цапфи, плазмове або електродугове наплавлення кулачка в середовищі аргону
Гребний вал	Сталь 40 з покриттям із бронзи БрКЗМЦ	Знос посадочних місць до 2 – 3 мм	Плазмове напилення або ГТН СФС-покриттів системи Ni – Cr – В – Si

Витрати на відновлення деталей ЗТ напиленням складають 15 – 20 % у порівнянні з витратами на виготовлення деталей при підвищенні їх зносостійкості в 2,5 – 3 рази.

Плазмове напилення (рис. 1.5) складається з розплавлення і перенесення металу плазмовим струменем [130 – 135]. В якості газу, що утворює плазму застосовують азот або аргон, які забезпечують температуру плазмового струменя до 40000°C. Матеріал, що напилюється у вигляді порошку подається в сопло плазмотрона з дозатора за допомогою транспортуючого газу (азоту). Потрапляючи в плазмовий струмінь, металевий порошок розплавляється і, підхоплений плазмовим струменем, наноситься на поверхню деталі, утворюючи покриття (рис. 1.5). Плазмові покриття зменшують знос деталей в 3 – 4 рази [130 – 135], проте мають такі недоліки, як шум при роботі, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання, високу вартість газів, що утворюють плазму.

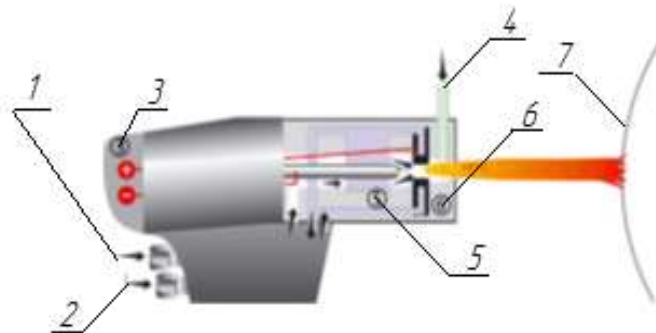


Рисунок 1.5 - Плазмове напилення: 1 – інертний газ; 2 – охолоджуюча вода; 3 – постійний струм; 4 – порошок; 5 – катод; 6 – анод; 7 – деталь

При детонаційному напиленні розплавлення металу [121 – 125], його розпилення і перенесення на поверхню деталі досягаються за рахунок енергії вибуху суміші ацетилену і кисню (рис. 1.6).

Плазмове і детонаційне напилення вимагає великих витрат на обладнання і газ, що використовуються.

При виборі способу ГТН необхідно враховувати умови формування покриттів: частка участі матеріалу деталі в покритті повинна бути близька

до нуля; в зоні з'єднання не повинні розвиватися процеси релаксаційного характеру, здатні змінити її структуру і фазовий склад.

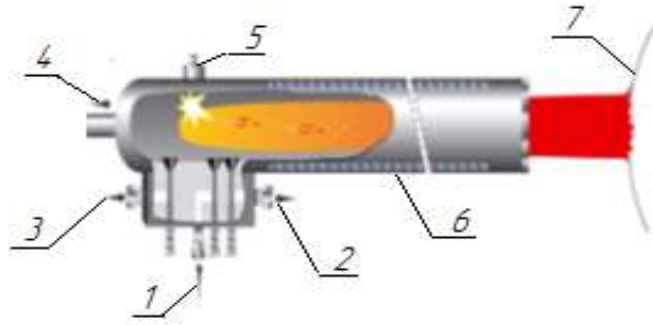


Рисунок 1.6 – Детонаційне напильня: 1 – ацетилен; 2 – кисень; 3 – азот; 4 – порошок, що напильюється; 5 – пристрій підпалу 6 – вихідна труба з водяним охолодженням; 7 – деталь

З цих позиції перспективним є використання ЕДН і ГПН [125 – 129, 45, 136 – 155]. Серед способів ГТН вони є найдешевшими і простими методами, мають технологічну гнучкість застосування до різних типорозмірів деталей, ефективні і економічні для підвищення експлуатаційних властивостей при відновленні деталей ЗТ в умовах невеликих майстерень і ремонтних підприємств (рис. 1.7) [90 – 95, 102 – 122].

При ГПН джерелом теплової енергії є газове полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші кисню (стисненого повітря) – горючого газу (ацетилену, пропан – бутану, природного газу та ін.) [125 – 129], яка витікає з соплових отворів пальника з великою швидкістю (рис. 1.8). Матеріал покриття, потрапляючи в факел ацетилено – кисневого полум'я пальника, розпильюється і переноситься на поверхню деталі, формуючи покриття.

Метод ГПН відрізняється простотою і низькою вартістю обладнання, легкістю і простотою його обслуговування, невеликими габаритами, відносно низьким рівнем шуму і випромінювання, що дозволяє працювати оператору без засобів захисту і наносити покриття в будь – якому просторовому положенні [125 – 129].

Однак, ГПН забезпечує недостатній рівень міцності зчеплення покриттів з основою; наявність пористості, обмеження матеріалів, що напильються по температурі плавлення (3000°C) [125 – 129]. Значно обмежує застосування ГПН низький коефіцієнт використання матеріалу (КВМ).

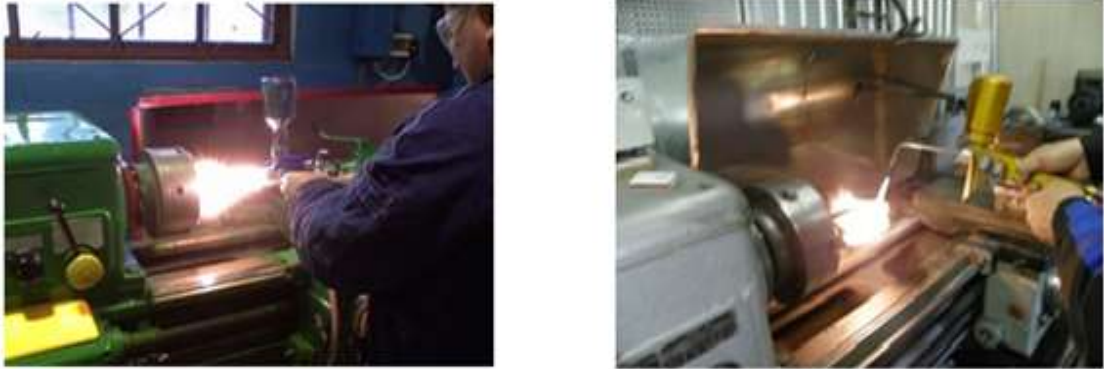


Рисунок 1.7 – Процес ГПН



Рисунок 1.8 – Блок управління робочими газами (а), пістолет для розпилення матеріалу (б)

Розглянуті традиційні методи відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення покриттів мають ряд недоліків, які обмежують їх застосування і не задовольняють запитам ремонтних підприємств. Удосконалення існуючих та розробка простих в експлуатації і дешевих технологій відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення ЗЗП дозволить підвищити їх експлуатаційні властивості, зменшити поставки запасних частин по дорогим, металомістким і дефіцитним деталям, в тому числі, імпортного виробництва, для заміни зношених деталей.

З урахуванням усіх недоліків покриттів в ІПМіц. імені Г. С. Писаренка НАН України розроблений новий принцип нанесення ЗЗП підвищеної термомеханічної стійкості [212 – 218]. Суть принципу – заміна суцільного шару покриття переривчастим шаром мозаїчно-дискретної структури [212 – 218]. Розміри і конфігурація ділянок покриття встановлюються виходячи з умови мінімізації рівня НДС при силових і температурних діях на покриття.

Новий принцип дозволяє багаторазово підвищити граничний стан покриття: контактні навантаження – у декілька разів, критичні деформації розтягу – до 2 порядків, довговічність – у декілька разів в порівнянні з суцільним покриттям тієї ж товщини, складу і твердості [212 – 223]. ЗЗП дискретного типу і створення на їх основі композиційних структур з мінімальним зносом пропонують застосовувати для відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ, які працюють в екстремальних умовах експлуатації. Підхід по створенню поверхонь з дискретною топографією широко застосовується при формуванні поверхонь пар тертя з мастилом.

Покриття дискретної структури можна створювати різними технологічними способами [212, 214 – 216]. Найбільш простий і доступний для нанесення дискретного покриття спосіб ЕІЛ, який дискретний за своєю природою. При отриманні дискретних покриттів за допомогою вакуумних технологій використовується ряд допоміжних прийомів – екрануючі пасти, маски і різні сітки [213, 215]. При цьому використовується серійне технологічне устаткування без яких-небудь змін. Забезпечення дискретної топографії поверхні при азотуванні запропоновано здійснювати нанесенням на зразки сітчастого екрану з пасти, матеріал якої виконує як активуючу, так і екрануючу функції. Широке використання мають методи локального зміцнення на основі. Дискретне точкове загартування дозволяє уникнути деформаційних поводок за рахунок відсутності середовищ загартовування і температури в оброблюваній деталі менше 100 °С. «Сухий» і «холодний» процес вимагає на порядок менше витрат електроенергії в порівнянні із

загартуванням СВЧ [216]. Дискретну поверхню можна створити застосуванням фасонного електроду при нанесенні покриттів методом ЕКПП [212]. Автором [212] показано, що дискретна топографія характеризується зменшенням сил тертя і напружень розтягу в зоні інтерфейсу. Шляхом моделювання НДС суцільного і дискретного покриття [212] зроблено висновок про вплив типу покриття і його геометричних параметрів на розподіл напружень в покритті, обґрунтовано підвищення міцності і зносостійкості дискретного покриття в 2 – 3 рази в порівнянні з суцільним покриттям. При цьому ефективність дискретизації досягається шляхом вибору конструктивних параметрів дискретної топографії, управління технологічними параметрами її отримання та їх поєднанням [212, 222]. В роботі [213, 216] розвинена ідея формування покриттів дискретного типу методами фізичного осадження, зокрема, комбінованим методом, коли на деталі з струмопровідного матеріалу методом реактивно електронно – плазмового напилення (РЕПН) формуються поодинокі ділянки з чистого металу, які потім в розряді реактивного газу модифікуються в хімічні сполуки (азотування покриття). Отримане таким чином покриття (рис. 1.9) в 2,5 – 3 рази підвищує зносостійкість в порівнянні з суцільним покриттям, а параметр шорсткості поверхні в 1,5 – 2,0 рази нижче. Залишкові напруження розтягу в покриттях дискретного типу нижче в порівнянні з залишковими напруженнями в суцільних покриттях. Авторами [214, 217] запропонований принцип створення PVD – покриттів дискретного типу у вигляді каркаса або сітки з регулярними заглибленнями. Формування таких поверхонь реалізується за допомогою активних екрануючих паст.

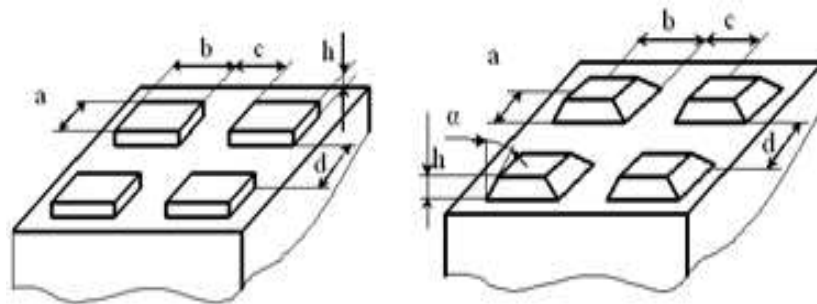


Рисунок 1.9 – Схеми дискретних покриттів

При розробці способу відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ шляхом нанесення покриттів з усіх можливих способів необхідно вибирати спосіб, який забезпечить максимальний термін служби деталі і найменшу її собівартість [91 – 94]. При виборі способу нанесення покриттів необхідно враховувати основні умови формування якісних покриттів [91 – 94]: частка участі матеріалу деталі в матеріалі покриття повинна бути близька до нуля; термічний вплив на деталь має бути мінімальним.

При цьому, систему «відновлена поверхня – покриття» необхідно розглядати як конструкцію, так як має місце відмінність властивостей матеріалів деталі і покриття, а на кордоні контакту покриття з відновлюваною поверхнею деталі формується перехідна зона. Матеріал покриття вибирають виходячи з матеріалу деталі і умов її експлуатації. Метод нанесення покриттів визначається робочою температурою компонентів покриття і геометрії виробу.

При розробці способів відновлення поверхонь КЕ деталей ЗТ шляхом нанесення ЗЗП спостерігаються декілька основних тенденцій [83, 88]:

- розробка і використання комбінованих, інтегрованих, гібридних технологій [169, 172, 147 – 153];
- розвиток багатоопераційних технологій [138, 141, 178 – 184];
- створення багат шарових покриттів. Кожен шар у багат шаровому покритті виконує власну функцію і забезпечує плавний перехід фізико – механічних властивостей від покриття до відновлюваної поверхні КЕ ЗТ [224 – 229]. Багат шарові покриття дозволяють поліпшити механічні та трибологічні властивості і створити ефективні композиції з точки зору поєднання різних характеристик: таких як міцність, низький коефіцієнт тертя, блокування теплових потоків. Забезпечити адгезійну міцність в системі «основа – покриття» і підвищити товщину захисного покриття можна, якщо між покриттям і основою розташувати тонкі буферні металеві шари Ti, Cr, Al. Одними з перспективних покриттів є багат шарові покриття

з нанорозмірними зернами [224]. Багатошарові покриття з наношарами демонструє зниження коефіцієнта тертя і підвищення адгезійної міцності [229];

– створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття [224, 225, 228, 229]. Методи створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття знижує надійність отримання покриття високої якості, так як брак в одному з шарів призводить до зниження якості всього покриття.

Проблема відновлення КЕ деталей ЗТ ЗЗП складається з декількох самостійних, хоча і пов'язаних між собою, завдань:

- визначення працездатності покриття;
- визначення впливу покриття на властивості міцності деталі;
- оцінка несучої здатності системи «відновлювана поверхня-покриття».

Кожне з цих завдань з точки зору експериментальної механіки матеріалів вимагає своїх методичних підходів і аналітичних методів опису закономірностей, необхідних для оптимізації способу і прогнозування реального ресурсу деталей з покриттями.

1.6 Тенденції розвитку комбінованих, інтегрованих, гібридних, методів нанесення ЗЗП

Дослідження в області міцності, тертя, зношування і принципово нових типів матеріалів з'явилися передумовою для створення на цій основі нових способів, спрямованих на вирішення питань відновлення і підвищення ЗТ та їх елементів. Створення способів із застосуванням комбінованих технологій і прогресивного устаткування є досить актуальним завданням. Найважливіша роль у вирішенні цього завдання належить створення наукових основ синтезу інтегрованих або так званих «гібридних», комбінованих процесів нанесення ЗЗП [25, 166 – 172].

В даний час в практиці відновлення знайшли застосування наступні

комбіновані процеси [25, 166 – 172]: ХТО електролітичних і гальванічних покриттів [230 – 232]; ХТО з ППД (азотування з дробоструменевим наклепом, з холодною накаткою, цементування з ППД, зокрема наклепом дробом) [233 – 235]; ХТО лазерно – легованих сталей [236 – 239]; ЛО електрохімічних [240 – 242], електролітичних [243] і дифузійних покриттів [244]; ЛО з ТО [245], після азотування [246 – 249]; ЕМО дифузійних покриттів [250]; обробка покриттів ППД [251], вібраційної обробкою [252] і УЗО [253 – 255]; УЗО з ІА [254]. УЗО з КЕП [255]; ЕПО з легуванням вибухом [256 – 260]; ГТН з модифікуванням [178], з ППД [261], з вібраційною обробкою [262], з УЗО [263], з нагріванням СВЧ [264], з ТО [265], з індукційним нагріванням [266, 267], з ЕПО [268 – 270]; ХТО газотермічних покриттів [271, 272]; ГТН з подальшою ЕКО [273 – 275]; з ТМО [276 – 278].

Як показує вітчизняний і зарубіжний досвід [25, 165 – 172, 279] найбільш ефективні комбіновані способи нанесення ЗЗП. В умовах зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей, що вимагають високого комплексу характеристик міцності, перспективними є комбіновані способи зміцнення сталей з малим вмістом вуглецю. Розробка комбінованого способу є актуальним завданням і може зробити ремонтне виробництво рентабельним [25, 165 – 172, 279].

Знаходять застосування комбіновані способи в поєднанні ЛО і ХТО [236 – 239]. Ця комбінація дозволяє отримувати за рахунок виділення зміцнюючих дисперсних фаз високу твердість (до 20 ГПа), що призводить до збільшення зносостійкості в 1,5 – 3 рази. Попередня дискретна ЛО вносить істотний внесок у процес ПА [246 – 249]. Процес насичення поверхні азотом прискорюється в 17 разів, зносостійкість в 2,5 рази. Комбінація ЛО з ПА істотно збільшує глибину зміцненої зони і забезпечує підвищенням твердості порівняно з ПА. Твердість і показники зносостійкості залежать від розподілу залишкових напружень в поверхневих шарах. Азотований шар характеризується наявністю залишкових напружень стиску, які є причиною

поліпшення характеристик циклічної міцності. Критерій залишкових напружень може бути використаний для прогнозування межі витривалості зміцнених деталей як при циклічному вигині, так і в умовах розтягу – стиску.

Електроіскрове легування, як і лазерні технології, відноситься до способів, що використовують висококонцентровані енергетичні джерела [280]. Цим істотно збільшується глибина шарів підвищеної твердості. ЛО ЕІЛ – покриттів підвищує їх експлуатаційні характеристики, знижує шорсткість, підвищує мікротвердість покриттів і опір зносу [281]. Різна послідовність ЕІЛ і азотування дозволяє управляти розподілом мікротвердості в покритті. У комбінаціях технологій ЕІЛ, ЛО та ЕЛО з ІА спостерігається ефект неаддитивності.

Технологія відновлення зношених деталей електролітичним залізненням з подальшою нітроцементацією забезпечує високу міцність зчеплення, зносостійкість і втомну міцність [161]. Твердість, зносостійкість і корозійну стійкість сталевих поверхонь з ГТН – покриттями на основі Ni – Cr (Fe, Si, B) можна підвищити шляхом ЕПО [268 – 270].

Слід зазначити явище інверсії, коли зміна послідовності операцій відновлення призводить до результатів, що відрізняються [83]. Вибір операцій та їх послідовність визначаються підвищенням комплексу механічних властивостей та зносостійкості.

З інтегрованих технологій найбільший ефект за несучою здатністю забезпечують дуплексні покриття [83, 339]. Дуплексні (комбіновані) покриття забезпечують п'ятикратне підвищення твердості, зносо – і корозійної стійкості. Використання дуплексних покриттів знижує ймовірність пластичної деформації деталі в умовах контактного навантаження, забезпечує підвищення несучої здатності і витривалості системи «відновлена поверхня – покриття» [339].

Перспективним напрямком при відновленні та підвищенні експлуатаційних властивостей деталей ЗТ є використання комбінованих методів нанесення ЗЗП [262 – 268]. Комбіновані методи нанесення ЗЗП

засновані на використанні двох або трьох методів нанесення покриттів, кожен з яких дозволяє підсилити ту чи іншу їх експлуатаційну властивість. При відновленні та підвищенні експлуатаційних властивостей застосовують комбінації ХТО (азотування) і ППД [284], ЛО та ХТО [286], КЕП і ЛО [287 – 292], ІА та УЗО [313], ГТН і УЗО [322], ГТН з ЛО [324 – 329], ГТН з ЛО і УЗО [323]. Використовують комбінацію ГТН з ТО СВЧ і ЛО [330].

При виборі комбінованих, гібридних та інтегрованих процесів відновлення необхідно знижувати температуру нанесення покриттів [25,166 – 172] і враховувати наступні положення:

- по – перше, розплавлення основи і покриття в процесі відновлення небажано, оскільки призводить до зміни хімічного складу і властивостей матеріалів покриття і деталі;

- по – друге, тепловий режим нанесення покриттів повинен забезпечувати сприятливий характер розподілу залишкових напружень. Зокрема, в покритті і в зоні з'єднання його з відновлюваною поверхнею деталі мають місце залишкові напруження стиску, які сприяють підвищенню опору втомі;

- по – третє, тривалість процесу нанесення покриттів повинна бути мінімальною, щоб його структура не мала небажаних змін.

Критерієм вибору комбінованих, гібридних та інтегрованих способів відновлення є порівняння витрат і збільшення комплексу механічних властивостей відновлених деталей [83]. Кожна технологія відновлення має свою нішу оптимальних умов використання. В даний час ще не існує методології синтезу багатоопераційних технологій. У інтегруванні технологій переважає емпірично – інтуїтивний підхід [83]. Вирішальним фактором у виборі первинних і завершальних технологій є наявність на підприємстві окремих видів устаткування і можливість інтегрувати їх в єдиний технологічний цикл.

Розгляд великої кількості альтернативних варіантів технологій для відновлення працездатності і підвищення експлуатаційних властивостей

деталей ЗТ та їх аналіз дозволили в даній економічній ситуації, що склалася в Україні, вибрати спосіб ЕДН в якості оптимальний способу відновлення КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ різного призначення.

1.7 Обґрунтування вибору ЕДН в якості базового методу для синтезу комбінованого способу відновлення деталей ЗТ

У світовій практиці зміцнення, відновлення та антикорозійного захисту деталей ЕДН набуло значного поширення як один з найбільш продуктивних методів ГТН (продуктивність процесу в 3...4 рази вище, ніж при ГПН) [136, 137]. За даними «Metallization UK» ЕДН наносять більше 75 % покриттів, і відновлюють близько 60 % найменувань деталей, що зношуються, які забезпечують зносостійкість на рівні нових [136, 137].

Електродугове напилення є універсальним методом нанесення покриттів і має широку область застосування для відновлення деталей зі сталі, чавуну і кольорових металів, які працюють в умовах нерухомих посадок, тертя ковзання і мастила. Метод ЕДН використовується для нанесення покриттів на великогабаритні, тонкостінні і довгомірні деталі, для виготовлення підшипників ковзання з антифрикційними покриттями; нанесення зносостійких покриттів на деталі ЗТ, які працюють в умовах знакозмінних і високих контактних навантажень [2, 15, 139 – 144]. Габарити деталей не лімітують застосування ЕДН. Нанесення покриттів ЕДН дротяних матеріалів економічно ефективно для відновлення деталей в умовах як ремонтних підприємств з крупносерійним виробництвом, так і невеликих майстерень.

В даний час ЕДН знаходить широке застосування, особливо в європейських країнах, і витісняє традиційний метод ГПН [136, 137]. Це обумовлено поширеністю і доступністю джерела енергії, отриманням покриттів з дещо більшою міцністю зчеплення, більш високою тепловою ефективністю, що досягає 57 % в порівнянні з 13 і 17 % при ГПН і

плазмовому напиленні відповідно [136]. Покриття за якістю практично не поступаються покриттям, нанесеним плазмовим і детонаційними методами [136, 137, 140]. Над розробкою і дослідженням технології ЕДН працюють фахівці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ (Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, В.Н. Коржик) [109, 116], група вчених під керівництвом В.І. Похмурського в фізико – механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАНУ [146, 149], фахівці зарубіжних фірм (Metco, Castolin) і інших наукових центрів [106 – 109]. Величезний внесок у розвиток ЕДН внесли дослідження К.А. Ющенко, В.С. Івашко, В.Е. Барановського, Ю.А. Харламова, М.А. Білоцерківського, М.М. Студента і других вчених [103 – 111].

Сутність процесу ЕДН полягає в нагріванні (до плавлення) електричною дугою електродів і розпиленні розплавленого металу стислим повітрям (рис. 1.10) [136]. Принципова схема процесу ЕДН досить проста (рис. 1.10, а). Через два канали в розпилювальній головці апарату для напилення подають два дроти, між кінцями яких порушується електрична дуга [136]. Струм стисненого газу (повітря), що виходить з центрального каналу головки апарату для ЕДН, розпилює розплавлений метал дротів і транспортує його в вигляді потоку частинок до поверхні деталі (рис. 1.10, б).

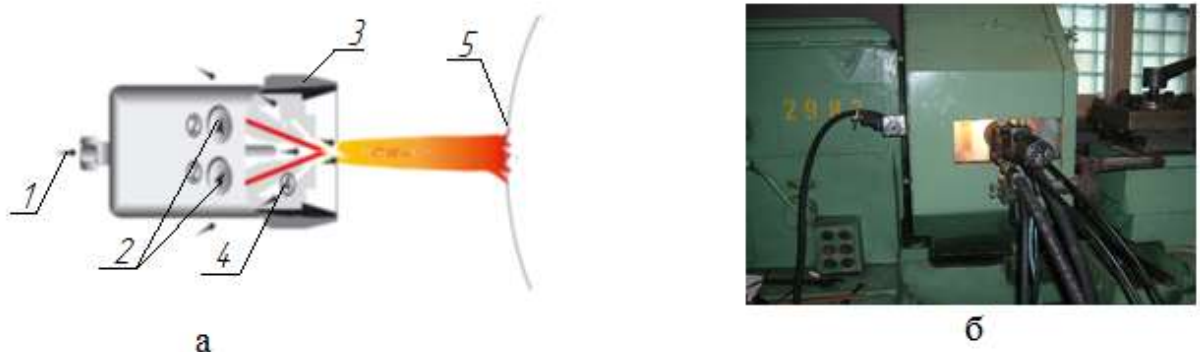


Рисунок 1.10 – Електродугове напилення: а) схема ЕДН (1 – газ для розпилення, 2 – подача дроту, 3 – сопло, 4 – дріт, 5 – деталь); б) процес ЕДН

Для напилення використовують дріт з електропровідних і терморегуючих матеріалів у вигляді суцільного або порошкового дроту

діаметром 0,8; 1,0; 1,6 і 2,0 мм [49, 146 – 150].

При ЕДН розпилюємий матеріал потрапляє на відновлювану поверхню у вигляді дрібних крапель, які охолоджуються.

При цьому твердість напиляного шару може перевищувати твердість вихідного матеріалу. Технологія ЕДН складається з трьох операцій: САО або іншого виду обробки (щітками, нарізанням різьблення та ін.), нанесення підшару (або без нього) і нанесення покриття [136, 148, 282 – 290]. Збільшення міцності зчеплення напиленого покриття пов'язано зі збільшенням площі і шорсткості відновлюваної поверхні шляхом попередньої обробки [288 – 290]. Напилене покриття піддають МО (різанню або шліфуванню) [291 – 293].

Основними технологічними параметрами ЕДН: склад, діаметр і швидкість подачі дротів; потужність дуги, витрата газу, дистанція напилення. При напиленні дистанція напилення становить 100 – 200 мм [136]. Якість ЕДН – покриття в значній мірі залежать від технічних характеристик джерела живлення і конструкції ЕДН – апарату. В даний час, в експлуатації знаходиться широка номенклатура апаратів для напилення різних фірм (табл. Б.1, додаток Б) [148, 294 – 298]. Удосконалення обладнання для ЕДН йде по шляху розширення технологічних можливостей [148, 294 – 296], підвищення продуктивності і зручності експлуатації, скорочення втрат матеріалу, що напилюють і підвищення якості покриттів. Так, наприклад, в апаратів ЕДМ – 6 ГД з газодинамічним диспергуванням металу прийнята схема зовнішнього безкамерного згорання. Енергоносій – електрична дуга і стиснене повітря замінюють електричною дугою і високошвидкісним струменем продуктів згорання рідкого вуглеводневого палива [294]. Це дозволяє зменшити окислювальний потенціал середовища в порівнянні з повітрям в 2 рази, збільшити адгезійну міцність покриття на 56 % і твердість на 18 %, знизити пористість покриття в 2,6 рази, відмовитися від порошкового дроту і застосовувати в 2 – 3 рази дешевші стандартні цільнотянуті дроти, знизити вартість процесу ЕДН. Таким чином, шляхом

вдосконалення конструкції апарату для ЕДН [294 – 298] і підвищення захисно – енергетичного рівня факела розпилу можливо знизити окислення диспергованого металу в факелі розпилу, збільшити швидкість польоту частинок і тим самим підвищити експлуатаційні властивості відновлюваних поверхонь деталей.

Доцільність застосування ЕДН забезпечується: високою продуктивністю (до 20 кг/год сталі); зносостійкістю (в 1,5 – 1,38 рази вище загартованої сталі 45); собівартістю (в 1,4 – 1,8 рази нижче наплавлення); доступністю джерела енергії; технологічної гнучкістю застосування до різних типорозмірів деталей; відсутністю значного термічного впливу на деталь (температура нагріву деталі становить 100 – 150 °С); нанесенням покриттів товщиною до 10 мм з різних матеріалів (сталь, чавун та ін.) із заданими властивостями [136, 137].

У роботах [49, 142, 144] наводяться відомості про перевагу ЕДН перед наплавленням по трудомісткості і витраті електродного матеріалу: тривалість наплавлення 1 год 10 хв, витрата дроту 1,3 кг; тривалість ЕДН – 24 хв, витрата дроту – 0,95 кг. Позитивні якості ЕДН не могли бути не помічені. Використання тепла електричної дуги для плавлення електродів дозволяє впроваджувати цей енергозберігаючий метод як для ремонтних підприємств, так і невеликих майстерень [140, 141, 151, 153].

Крім позитивних якостей ЕДН має і недоліки [136, 154, 155]: малі швидкості подачі дроту, що підвищує окислення металу і пористість (40 – 50 %); недостатня адгезійна міцність зчеплення (25 – 40 МПа); невисока твердість (35 – 50 HRC) покриттів, що є причиною вигорання вуглецю в процесі напилення (вміст вуглецю в матеріалі покриття знижується на 40 – 60%), що знижує їх зносостійкість; можливість появи в покритті тріщин і відшарування в результаті розпилення холодним стисненим повітрям розплавлених частинок металу. Через недоліки ЕДН, його використання для підвищення експлуатаційних властивостей і відновлення деталей ЗТ обмежена. У зв'язку з цим, для поліпшення фізико – механічних властивостей

напилених електродуговим методом покриттів, доцільно об'єднати метод ЕДН з методами модифікування і обробки ЕДН – покриттів, тобто створити комбіновані методи ЕДН з ХТО, ЛО, УЗО, МТО та інші з метою підвищення експлуатаційних властивостей відновлених поверхонь деталей ЗТ.

1.8 Аналіз технологій для створення комбінованого методу відновлення ЗЗП з поліпшеними фізико – механічними і експлуатаційними властивостями

Підвищення властивостей ЕДН – покриттів є невід'ємною і обов'язковою частиною ТП при їх напиленні [167 173, 175, 184, 185]. Незважаючи на велику кількість розробок в області підвищення властивостей ЕДН – покриттів [168 – 174, 176 – 183], дослідження розвиваються активно і в даний час, причому вони придбали спрямованість на їх модифікування і обробку [261 – 279,]. Відзначають істотне підвищення зносостійкості напилених покриттів поєднанням з УЗО [263], з ТО [265], з ЕПО [268 – 270] та іншими методами.

Модифікування напилених покриттів на відновлюваних поверхнях деталей ЗТ можливо проводити як зміною структури поверхневих шарів, так і зміною хімічного складу [137, 146, 149].

До першої групи відносять такі методи як ЛО [179 – 184], надшвидке загартування [196, 265] тощо. Однак вони вимагають використання спеціального обладнання та додаткових витрат, пов'язаних з енергоємністю даних процесів.

До другої групи модифікування відносять гальванічні способи нанесення покриттів і ХТО, або їх комбінації [160 – 162, 271 – 272].

Засобами для досягнення необхідної структури і властивостей напилених покриттів є різні види ТО [264 – 267], ХТО [271, 272], ТМО [276 – 278], ППД [261, 262], в тому числі УЗО [263] та ін.

Поліпшити характеристики покриття дозволяє ППД [261, 262]. З метою підвищення корозійної стійкості ЕДН – покриттів шляхом зменшення

пористості застосували САО [284, 285]. Оплавлення ЕДН – покриттів для поліпшення їх властивостей здійснюють СВЧ [264], індукційним нагріванням [266, 267], ЕПО [268 – 270].

Для підвищення триботехнічних характеристик ЕДН – покриттів використовують ВО [262] і УЗО [263]. УЗО ЕДН – покриття забезпечує отримання шару з щільністю близькою до 100% від компактного матеріалу, що особливо важливо для зносостійких покриттів. Застосування УЗО ЕДН – покриття робить позитивний вплив як на структуру контактної зони покриття з деталлю, так і на структуру покриття. У контактній зоні активізуються дифузійні процеси. Матеріал покриття проникає на глибину до 50 мкм в поверхню деталі по границі поміж зернами, що забезпечує високу міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею деталі. У самому покритті значно подрібнюються всі структурні складові. Це забезпечить підвищення тріщиностійкості покриття при збереженні рівня зносостійкості.

Особливий інтерес представляє методи підвищення властивостей ЕДН – покриттів, пов'язані з подальшою їх індукційною обробкою [266, 267], ЛО [179 – 184], ЕПО [268 – 270], ХТО [271 – 272] тощо. Найбільш численні дослідження ЛО ЕДН – покриттів. Головне завдання ЛО ЕДН – покриттів – підвищення їх адгезійної міцності. Як наслідок зростання адгезійної міцності забезпечує підвищення зносостійкості відновлюваної поверхні з покриттям і її антифрикційні властивості. Для ЕДН – покриття підвищення зносостійкості після ЛО пояснюють зростанням твердості покриття на 20 %. Завдяки ЛО ЕДН – покриттів отримують структуру без пор з рівномірним розподілом хімічних елементів [181 – 183]. Цим істотно підвищується зносостійкість в умовах граничного тертя і абразивного зношування, стійкість до високотемпературної корозії при забезпеченні найменшого термічного впливу на основу. ЛО ЕДН – покриттів збільшує мікротвердість в 2 – 10 разів і зносостійкість в 1,5 – 3 рази [179, 180], підвищує їх стійкість до високотемпературної газової корозії. З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб спільної ЛО і обробки плазмою [179 – 183].

Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості і зносостійкості забезпечує ЕПО ЕДН – покриттів [268 – 270]. Аналіз структури показав, що середній розмір зерен в покритті зменшується від сотень мкм до сотень нанометрів, а мікротвердість збільшується в 5 разів. Межа витривалості підвищується на 60 – 80 %, а міцність зчеплення – в 2,5 – 3,5 рази після ЕПО. Однак, ЛО та ЕПО призводять до неоднорідною гетерогенної макроструктуру ЕДН – покриттів і не забезпечують їх хімічне модифікування.

Ефективне застосування ХТО після напилення [271, 272]. Після борування зносостійкість напилених покриттів зі сталі Св – 08 при сухому терті підвищилася в 100 разів. Підвищується також адгезійна міцність напилених покриттів. ХТО характеризується великою тривалістю процесу і не дозволяє проводити обробку великогабаритних виробів. У зв'язку з цим проблема підвищення міцності і зносостійкості ЕДН – покриттів є актуальною. ІА ЕДН – покриттів з сталей 40Х13 і Х18Н10Т забезпечувало мікротвердість від 6,5 до 15 ГПа в поверхневому шарі від 5 до 40 мкм. При цьому зносостійкість збільшилася в 8 разів [271, 272].

Для відновлення і зміцнення деталей ЗТ після ЕДН застосовують МДО [193 – 195]. В процесі МДО відбуваються зміни структури і механічних властивостей виробів, що забезпечують підвищення їх ресурсу в 1,3 – 1,4 рази [193 – 195]. Однак, формування при МДО плівки Al_2O_3 підвищує мікротвердість покриття з 750 до 3200 МПа і міцність при вигині на 60%. Відзначають також обмеження в застосуванні цієї багатоопераційної технології – недопущенням високих контактних і ударних навантажень. З метою збереження високих характеристик міцності покриттів товщина перехідної зони між основою і напиленням шаром, зміцненим МДО, повинна бути не менше 70 – 90 мкм [193 – 195].

В даний час знайшли застосування наступні «гібридні процеси» [25, 166 – 172, 178, 279]: ЛО, ЕЛО і УЗО напилених покриттів; напилення з подальшою холодної прокаткою, напилення з накладенням вібрацій або

нагріванням.

Більшість комбінованих, інтегрованих і гібридних способів відновлення вимагають відносно високих температур і тривалої обробки. Високі температури, як правило, негативно позначаються на «об'ємних» властивості відновлюваних деталей [25, 45, 49, 166 –172, 178, 279]. Тому, при виборі способу нанесення покриття та управління ТП необхідно прийняття заходів, спрямованих на збереження вихідних «об'ємних» механічних властивостей деталей.

Високу зносостійкість, твердість і інші властивості ЕДН – покриттів забезпечують механо – термічною зміцнюючою обробкою (МТЗО) [345-347]. МТЗО покриттів може проводитися в одній технологічному ланцюжку з процесом напилення відразу по шару сформованого покриття обкаткою в валках або роликами [376 – 378], нагріванням полум'ям додаткового пальника. Значне підвищення зносостійкості після МТЗО пояснюється позитивною роллю механічного фактору [377, 378]. Взаємодія матеріалів у твердій фазі активуються не тільки температурою, але і тиском [376 – 378]. Найбільшого поширення серед МТЗО отримала схема електроконтактного нагріву або термомеханічного спікання при прокатці покриттів мідним струмопровідним роликом [377, 378]. Найбільш доцільно високу зносостійкість, твердість і інші поверхневі властивості ЕДН – покриттів із сплавів на основі заліза забезпечувати таким економічним і високоефективним методом, як електроконтактна обробка (ЕКО). Використання комбінації технологій ЕДН і ЕКО відкриває великі можливості у створенні зносостійких покриттів. Так, наприклад, використання недорогих низьковуглецевих сталей в якості ЕДН – покриттів з подальшою ЕКО і термодифузійним насиченням, різко підвищує експлуатаційні властивості відновлюваних поверхонь. ЕДН з подальшим нанесенням графітової пасти і її ЕКО з одночасним термодифузійним насиченням один з найбільш ефективних шляхів вирішення завдання підвищення ресурсу і поліпшення

працездатності пар тертя ковзання, що експлуатуються при підвищених питомих навантаженнях. При цьому підвищення твердості і зносостійкості забезпечується за рахунок структурно – фазових перетворень в покриттях, отримані методами ЕДН, шляхом варіювання режимів їх ЕКО і використанням вуглець наповнювачів [273, 274].

Керуючи процесами структуроутворення, при високоенергетичному впливі можна конструювати градієнтні шари з необхідним комплексом експлуатаційних властивостей. Ефективним шляхом вирішення завдання підвищення експлуатаційних характеристик ЕДН – покриттів є формування в них високоміцних поверхневих шарів з градієнтної структурою за допомогою використання технології модифікування поверхневих шарів методом ЕКО [273, 274]. Об'єднання нанесення покриттів з модифікацією поверхні і обробкою покриттів дозволяє створити комбіновані методи інженерії поверхні [169, 172].

1.9 Синтез ЕДН, ЕІЛ та ПА для створення комбінованого способу відновлення деталей ЗТ

В роботі пропонується вирішувати проблему підвищення надійності ЗТ та їх елементів шляхом відновлення поверхонь їх КЕ комбінованим методом, що об'єднує ЕДН покриття для зміцнення з попереднім ЕІЛ відновлюваних поверхонь і фінішною обробкою напилених покриттів ПА.

Технологія ЕІЛ і комбінації на її основі найбільш підходять для операцій відновлення [2, 163 – 165, 180], даючи можливість обробки деталей на «місці», в тому числі, без демонтажу. Розширення сфери застосування методу ЕІЛ можливо при його поєднанні з ЛО [281]. ЕІЛ відноситься до способів з висококонцентрованими енергетичними джерелами [2, 15, 163 – 165]. Дискретна структура покриття, отриманого методом ЕІЛ [2, 163 – 165, 220 – 222], дозволяє (на відміну від суцільного покриття) застосовувати ППД,

яке проводиться одночасно з нанесенням диференціального дискретного покриття [222].

Спосіб ЕІЛ полягає в легуванні поверхневого шару відновлюваної деталі матеріалом електрода при іскровому розряді в повітряному або технологічному (газовому або рідкому) середовищі (рис. 1.11, а) [163 – 165, 220 – 222]. ЕІЛ здійснюється або на спеціалізованих установках, або на верстатах для МО, які оснащені генераторами, пристроями та інструментами. Устаткування для ЕІЛ дозволяє при необхідності обробляти ділянки деталей на готовому виробі в зібраному стані. Операції ЕІЛ можуть чергуватися з операціями МО і ТО в залежності від конкретної технологічної ситуації, а можуть входити в технологічний ланцюжок на різних етапах [163 – 165, 220 – 222]. Ефективність ЕІЛ обумовлена вибором матеріалу, з якого формується покриття або шар. Призначення захисних електроіскрових шарів і умови експлуатації відновлюваних деталей в основному і визначають вибір матеріалу, який треба нанести. Формування покриттів за допомогою ЕІЛ здійснюється за різними технологічними схемами, які складаються з різних типів руху легуючого електрода, відновлюваної поверхні і відносного переміщення електродів відносно один одного [163 – 165, 220, 222]. Для отримання якісних шарів методом ЕІЛ необхідно враховувати ряд наступних рекомендацій [163 – 165, 220, 222]: 1) кожному режиму ЕІЛ відповідає певна товщина шару; 2) для отримання поверхні з необхідною шорсткістю необхідно регулювати енергію імпульсів; 3) чим більше інертне середовище, в якому відбувається ЕІЛ, тим товщі можуть бути шари, які наносяться. Процес ЕІЛ характеризується такими особливостями: перенесення матеріалів залежить від ерозійної стійкості анода і катода; процес ЕІЛ нестабільний за часом; при ЕІЛ відсутня рівномірність по товщині шару. Перевагами ЕІЛ є простота, компактність і портативність устаткування, низька енергоємність, високий коефіцієнт використання матеріалів, локальне легування поверхні, відсутність необхідності попередньої підготовки поверхні, а також можливість застосування різних легуючих електродів. Короткочасність

імпульсів іскрового розряду запобігає розігріву матеріалу деталі і дає можливість відновлювати поверхню практично всіх матеріалів [45, 163 – 165, 220, 222]. ЕІЛ в порівнянні з іншими процесами має істотні переваги: хороше зчеплення нанесеного шару з матеріалом деталі; нанесення покриття без розігріву деталі; застосування простого в експлуатації обладнання.

На основі аналізу даних літератури [163 – 165, 220, 222] і практики можна стверджувати, що метод ЕІЛ найбільш ефективний для відновлення і зміцнення поверхні валів і осей під підшипники ковзання та кочення [45, 212, 219, 220]; деталей з конструкційних сталей, чавунів, бронзи і титанових сплавів [29, 45, 213, 216, 218]; різальних крайок сільськогосподарських машин [212] і ріжучих елементів інструменту для МО [214, 217, 222]. Метод ЕІЛ використовується для зміни фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей покриттів, а саме для підвищення їх міцності зчеплення, твердості, зносостійкості, корозійної стійкості, жаростійкості [29, 163, 165, 220, 222].

Застосування ЕІЛ стримується відносно невисокою продуктивністю процесу, недостатньою товщиною покриття, його значною шорсткістю. Такий недолік ЕІЛ як шорсткість може бути використаний для підготовки поверхні перед ЕДН для підвищення адгезійної міцності напилених покриттів. Шляхом збільшення товщини покриття до 0,2 – 0,5 мм і більше (грубе ЕІЛ) можна збільшити його шорсткість [270]. Вибором кінематичної схеми ЕІЛ можливо отримати необхідну шорсткість покриття. Практика використання методу ЕІЛ показала, що для отримання шарів з високою шорсткістю необхідно вибрати оптимальний технологічний прийом, режим обробки, міжелектродне середовище, матеріал легуючих електродів. Як матеріал електродів доцільно вибирати молібден або ніхром так як його найбільш часто використовують для нанесення підшару при ЕДН завдяки гарній адгезії до чорних металів.

З інтегрованих технологій найбільший ефект за несучою здатністю забезпечують дуплексні (комбіновані) покриття, що поєднують ХТО, зокрема

азотування, і ГТН [29, 271, 272, 339]. Дослідженнями швейцарської фірми «Sulzor Metro AG» показано, що твердість, зносостійкість і корозійну стійкість сталевих поверхонь з ГТН – покриттями на основі Ni – Cr (Fe, Si, В) можна збільшити в 3 – 4 рази шляхом азотування [178, 271, 272].

У роботі пропонується підвищити твердість і зносостійкість ЕДН – покриттів ПА. Технологія ПА при скороченні тривалості і енергоємності обробки є більш ефективною заміною цементації з загартуванням, відпадає необхідність в рідких гартівних середовищах. Ця технологія може замінити електролітичне хромування, при цьому поліпшити екологічні умови виробництва. Будучи фінішною операцією, ПА забезпечує стабільність форми і розмірів відновлюваних деталей і тому відпадає необхідність фінішної МО. ПА має переваги перед класичним варіантом азотування: скорочує тривалість процесу за рахунок прискореного перенесення маси азоту, збільшує глибину і якість азотованого поверхневого шару; знижує споживану потужність в 2 рази за рахунок циклічної подачі енергії.

Режим ПА збільшує глибину обробки більш, ніж в 3 рази і на 22% підвищує твердість поверхні. Застосування дискретного вводу енергії дозволяє збільшити швидкість нагріву і, відповідно, рівень термічних напружень в поверхневому шарі. Для цієї мети було використано технологічне обладнання, яке представлено на рис. 1.11, г.

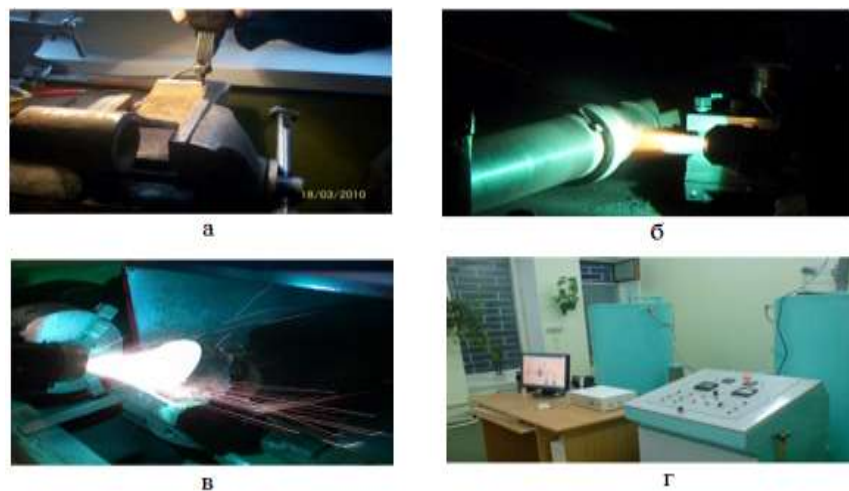


Рисунок 1.11 – Передбачувана схема комбінованого методу відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ шляхом нанесення ЗЗП: попереднім ЕІЛ (а); ЕДН (б, в) і обробкою напилених покриттів ПА (г)

Таким чином, застосування комбінованої технології ЕДН і ПА з попередніми ЕІЛ дозволить:

- підвищити адгезійну міцність і знизити рівень залишкових напружень в напилених покриттях за рахунок нанесення підшару методом ЕІЛ і підвищення шорсткості поверхні перед напиленням ЕІО;
- шляхом активування процесу ЕДН знизити пористість напилюваного шару і підвищити його мікротвердість, використовуючи при цьому для доступні матеріали;
- підвищити експлуатаційні властивості (зносостійкість і твердість) ЕДН-покриттів шляхом ПА;
- замінити фінішну МО електродугових покриттів на ПА.

Розробка технології відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом ЕІЛ+ЕДН+ПА (рис. 1.11) забезпечить отримання зносостійких покриттів товщиною від 0,1 до 10 мм, що дозволить використовувати її як для відновлення поверхонь КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ, замінивши при цьому дорогі леговані матеріали на дешеві з покриттями. У комбінаціях технологій ЕІЛ (ЕІО), ЕДН і ПА спостерігається ефект неаддитивності. Попередня ЕІО підвищує міцність зчеплення напилених покриттів, збільшує азотуємість сталей, глибину зміцненого шару і забезпечує багаторазове підвищення твердості і зносостійкості.

1.10 Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження

1. На підставі аналізу літературних джерел показана актуальність проблеми забезпечення надійності ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів.

Практика експлуатації ЗТ показала, що однією з головних проблем, які вона поставила, є проблема відновлення «старіючого» парку транспорту (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення),

розробка і впровадження маловитратних способів відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ.

2. На основі класифікації та аналізу основних методів відновлення поверхневих шарів КЕ деталей ЗТ різного призначення обґрунтовано, що використання комбінованих способів нанесення ЗЗП дозволяє керувати структурою поверхневого шару відновлюваних деталей, характеристиками зносостійкості, адгезійної міцності й іншими експлуатаційними властивостями в залежності від умов експлуатації ЗТ.

3. Шляхом аналізу літератури і патентних досліджень показана ефективність синтезу ЕІЛ, ЕДН і ПА для створення комбінованої способу нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення і підвищення надійності ЗТ та їх елементів.

Обґрунтовано, що серед способів нанесення ЗЗП найбільш поширений, найдешевшим і найпростішим метод ЕДН. Підвищити міцність зчеплення ЕДН – покриттів можливо шляхом поєднання його з ЕІЛ, з огляду на такий недолік як значна шорсткість поверхні.

Найбільший ефект за несучою здатністю, підвищенням твердості, зносостійкості і витривалості системи «відновлювана поверхня – покриття» при зниженні ймовірності деформації деталі може дозволити ПА покриттів, отриманих ЕДН.

4. На підставі отриманих висновків сформульована основна проблема, поставлена мета і завдання досліджень.

Основна проблема, яка розв'язується в дисертаційній роботі – розробка наукових основ підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ і забезпечення їх надійності за рахунок створення на їх робочих поверхнях багатофункціональних покриттів комбінованим способом.

Виходячи з результатів проведеного аналізу мета дисертаційної роботи полягає в забезпеченні надійності ЗТ 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 ЗТ, способів забезпечення їх надійності та класифікувати сполучення, що зношуються;

– обґрунтувати критерії, принципи та розробити концепцію ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів комбінованим способом (ЕІЛ, ЕДН та ПА) для забезпечення надійності ЗТ та їх елементів;

– розробити методи управління ресурсом ЗТ на основі визначення впливу параметрів комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів на якість відновлених робочих поверхонь їх елементів;

– 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 ЗТ та їх елементів.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [2, 3, 6, 10, 12, 15 – 21, 27, 28 – 31, 35, 40, 42, 44, 45, 49].

РОЗДІЛ 2

КОНЦЕПЦІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОЦЕСІ РЕМОНТУ, ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЇЇ ФОРМУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ НА БАЗІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

В розділі представлено концепцію забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ, яка полягає в забезпеченні надійності ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів, визначенні раціональні режими комбінованого методу нанесення покриттів та управління ресурсом деталей ЗТ на основі впливу факторів управляючої дії. Розроблені основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ в процесі ремонту, представлена реалізація концепції на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Обґрунтовано вибір напрямку дослідження та розроблено загальну методологію роботи, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення наукової проблеми.

2.1 Загальна методологія дисертаційного дослідження

Основоположним принципом та передумовою розробки методології забезпечення надійності і підвищення експлуатаційних властивостей КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ на основі багатофункціональних покриттів, отриманих комбінованим методом, є системність та комплексний характер дослідження показників адгезійної міцності та зносостійкості. Це дозволяє логічно упорядкувати складні процеси дослідження на спільній методологічній інформаційній базі системного підходу, в основі якого лежать

відомі принципи моделювання, що визначає основні операції системного дослідження (декомпозицію, змістовний аналіз, формалізований опис, моделювання, дослідження і вибір оптимального варіанту) (рис. 2.1).

Виходячи із системного підходу, організація дослідження становить собою ієрархічну структуру таких методологічних рівнів:

- проблемний аналіз, що припускає з'ясування суттєвості проблемної ситуації та актуальності проблеми, визначення мети дослідження і загальну постановку задач;

- концептуальний рівень дослідження, що вміщує аналіз системного оточення, виділення з нього ТП відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, який включає ЕІЛ, ЕДН і ПА, та обґрунтування його вибору, що створюють структурно – операційний базис концепцій проведення операції вибору;

- операційний рівень дослідження, що припускає проведення функціонально – морфологічного аналізу, визначення показників адгезійної міцності й зносостійкості та вибір за концепцією придатності кращих режимів для створення структурно – функціонального базису системного дослідження ТП відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів на детальному рівні й розробку його математичних моделей;

- детальний рівень дослідження, що вміщує формування структурно-елементарного базису операції вибору оптимальних проектних варіантів, обґрунтування й оцінку пропозицій щодо удосконалення способу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом;

- завершальний етап прийняття рішення щодо вибору оптимальних параметрів способу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, яке дозволить вирішити наукову проблему, яка припускає: аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально – морфологічний аналіз і розробку системи

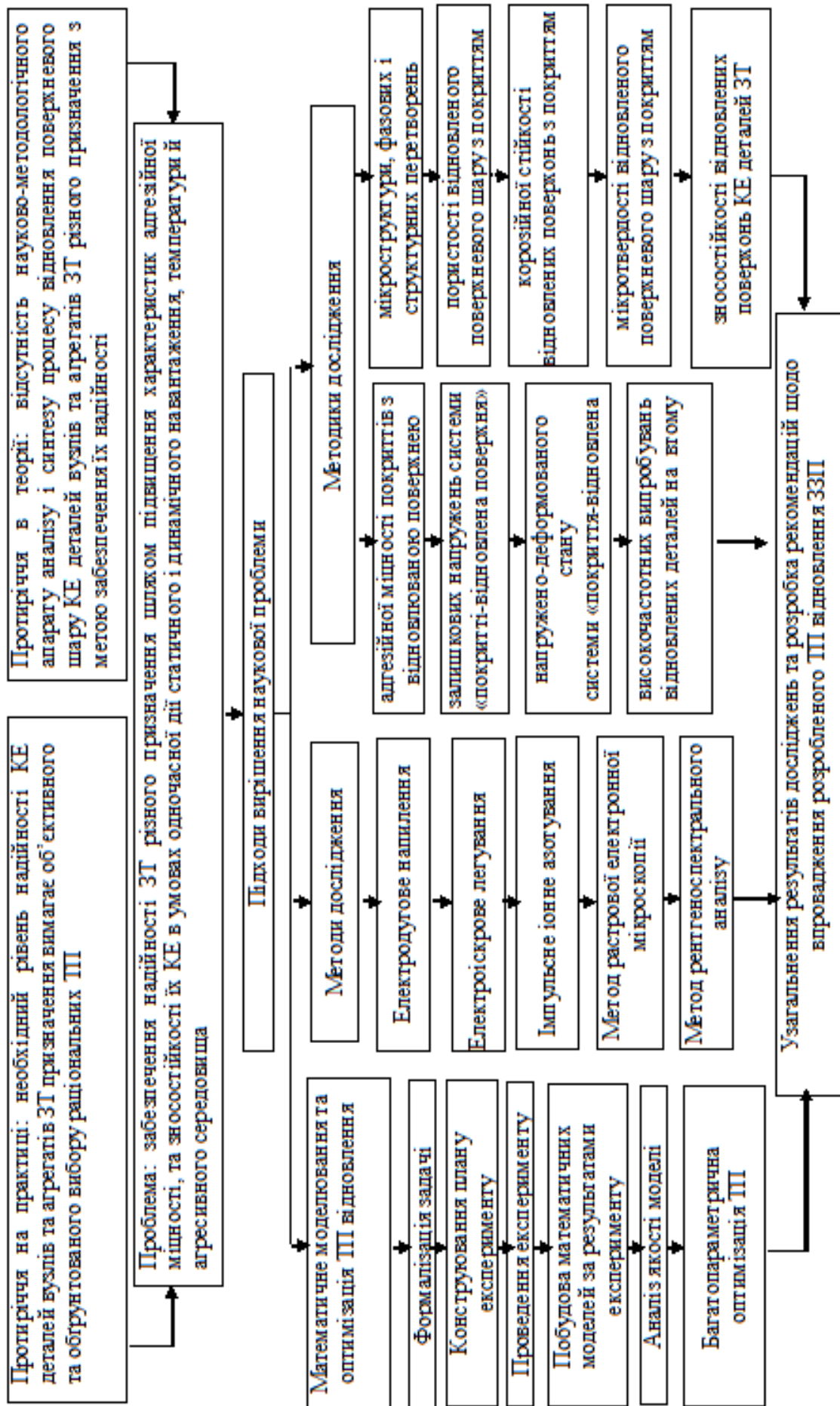


Рисунок 2.1 - Постановка наукової проблеми та шляхи її вирішення

показників якості, а також математичні описи й моделювання ТП з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них.

Для ефективного аналізу механізму явищ та управління способом відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу відновлення, і представити їх у кількісній формі – в вигляді математичної моделі [302 – 304]. Модель дозволяє отримати інформацію про процес відновлення, який протікає в об'єкті; розрахувати характеристики об'єкту; отримати інформацію, яку можна використовувати для управління об'єктом, що моделюється [305].

2.2 Концепція забезпечення надійності деталей засобів транспорту в процесі їх ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів

В дисертаційній роботі представлено концепцію ремонту вузлів та агрегатів ЗТ шляхом використання багатофункціональних покриттів комбінованим способом, який включає ЕІЛ, ЕДН та ПА для забезпечення надійності ЗТ та їх елементів.

Концепція забезпечення надійності деталей ЗТ в процесі їх ремонту враховує структурні та морфологічні особливості відновлюваної поверхні після ЕІЛ, вплив параметрів ЕДН на якість системи «відновлювана поверхня – покриття» та модифікуючу дію ПА на напиленні покриття.

Основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних КЕ деталей ЗТ в процесі ремонту включають функціональні, експлуатаційні, матеріально – технічні та технологічні аспекти ремонту деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.

Реалізація концепції базується на використанні системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання для ЕІЛ, ЕДН і ПА,

режимів відновлення шляхом нанесення покриттів і їх обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Формування багатофункціональних покриттів в процесі ремонту базуються на двох комплексних складових: інформаційній (IC) та науково – технологічній (STC).

– IC (ідентифікація елемента ТЗ (VEI), дефектація елемента ТЗ (DDVE), аналіз отриманої інформації (AIR), перевірка відповідності відновленої поверхні процесам ремонту (VCRP), оцінка поверхні після ЕІЛ (ESEA), оцінка поверхні після ЕДН (ESEAS), оцінка поверхні після ПА (ESPIN));

– STC (вибір способу підготовки відновлюваної поверхні (CSPM), вибір способу нанесення багатофункціонального покриття (CCM), вибір способу підвищення зносостійкості і мікротвердості (SMIRM), ЕІЛ (EA), ЕДН (EAS), ПА (PIN), вибір обладнання для ЕІЛ (SEEA), вибір обладнання для ЕДН (SEEAS), вибір обладнання для ПА (SEPIN), вибір режимів ЕІЛ (SMEA), вибір режимів для ЕДН (SMEAS), вибір режимів для ПА (SMPIN)).

Всі наведені елементи, що забезпечують структуру формування багатофункціональних покриттів нанесених комбінованим способом в інформаційній складовій (VEI, DDVE, AIR, VCRP, ESEA, ESEAS, ESPIN) та науково – технологічній складовій (CSPM, CCM, SMIRM, EA, EAS, PIN, SEEA, SEEAS, SEPIN, SMEA, SMEAS, SMPIN) є функціями організації та управління способом відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей КЕ деталей ЗТ в залежності від їх рівнів. Синтез отриманих функцій являє собою функціонал QRS (якісна відновлена поверхня) який характеризує якість відновлюваних поверхонь КЕ деталей ЗТ або сукупність їх експлуатаційних властивостей, що в подальшому впливає на надійність ЗТ.

$$QRS = F(IC(VEI, DDVE, AIR, VCRP, ESEA, ESEAS, ESPIN); STC(CSPM, CCM, SMIRM, EA, EAS, PIN, SEEA, SEEAS, SEPIN, SMEA, SMEAS, SMPIN))$$

У спрощеній формі функціонал QRS може бути виражений алгебраїчними величинами, що увійшли до нього з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$QRS = K_i \times F = F(K_i \times IC; K_i \times STC),$$

де K_i – вагові коефіцієнти, які виконують роль нормуючих множників, що приводять всі величини у відношеннях до одного порядку

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано системний підхід, 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 (рис.2.2).

Виходячи із системного підходу, організація досліджень представлена у вигляді ієрархічної структури наступних методологічних рівнів:

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.

Взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу ремонту представлений у вигляді структурної схеми формування багатофункціональних покриттів на всіх етапах ремонту КЕ ЗТ (рис. 2.2).

Системність і комплексний методологічний підхід щодо визначення

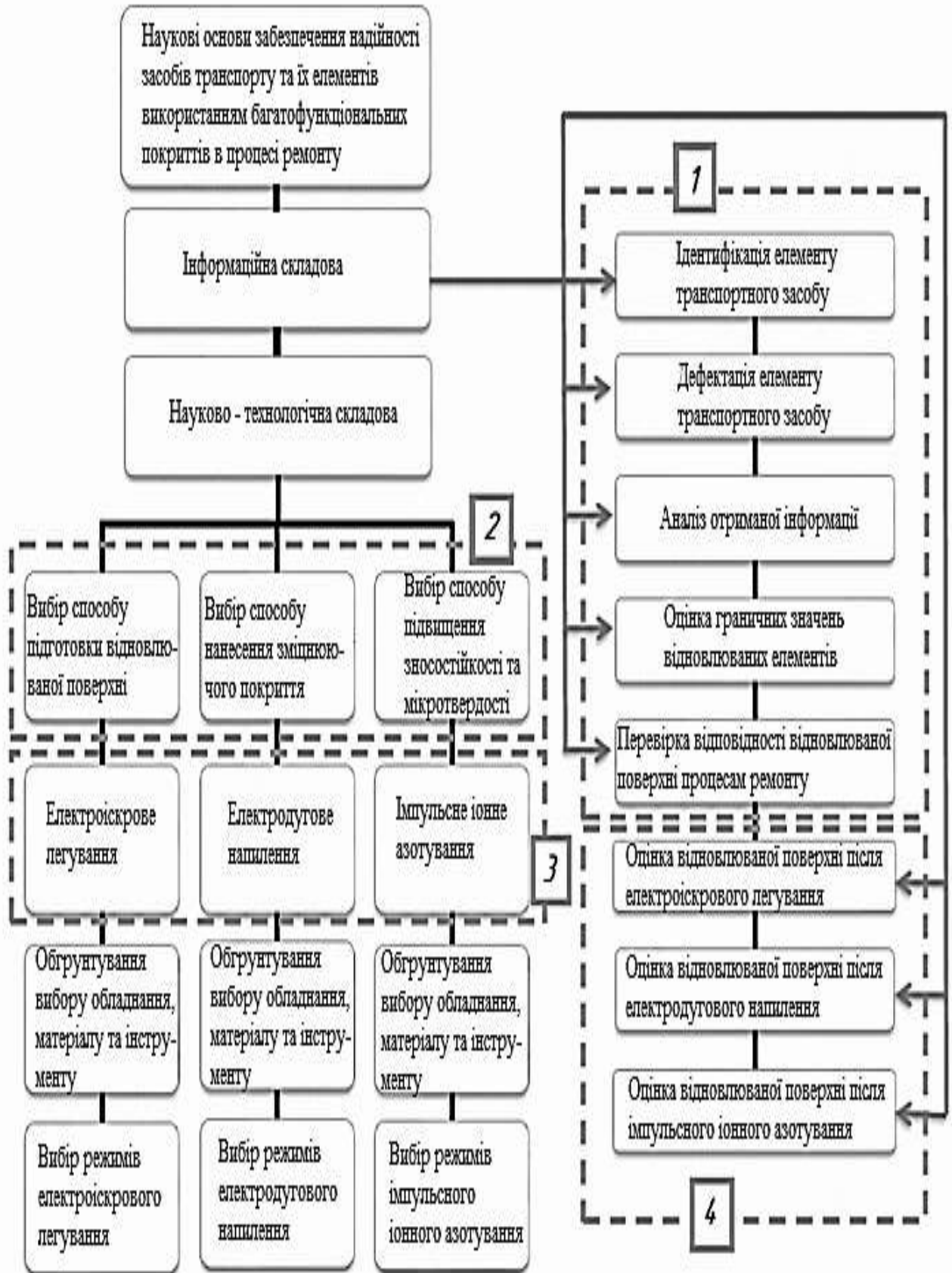


Рисунок 2.2 – Структурна схема формування багатofункціональних покриттів в процесі ремонту деталей ЗТ

закономірностей впливу режимів комбінованого способу формування багатофункціональних покриттів, що включає ЕІЛ, ЕДН і ПА, на їх фізико–механічні та експлуатаційні властивості, ресурс і надійність дозволяють логічно впорядкувати складні теоретичні і експериментальні дослідження на спільній методично – інформаційній базі. Так, системний підхід щодо визначення закономірностей впливу багатофункціональних покриттів на характеристики міцності зчеплення системи «відновлювана поверхня – покриття» і зносостійкості відновлених поверхонь КЕ деталей ЗТ дозволив створити основу для розробки принципу управління процесом ремонту з метою забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів.

Засоби транспорту різного призначення – складна технічна система, яка складається з багатьох модулів, систем, вузлів, агрегатів і окремих КЕ, надійність яких впливає на безпеку їх роботи, тому, дослідження в дисертаційній роботі представлені єдиною системою, що дало можливість оцінити взаємодію всіх її частин і об'єднати їх на необхідній методологічній основі (рис. 2.2).

Методологія роботи складається з послідовності дій встановлення структурних зав'язків між теоретичними та експериментальними дослідженнями, що спираючись на комплекс статистичних та математичних методів, а саме методів морфологічного аналізу, теорії множин, математичної статистики, регресійного аналізу.

2.3 Формалізація завдання забезпечення заданих властивостей багатофункціональних покриттів

Кількість способів поверхневого зміцнення деталей постійно зростає, що дозволяє забезпечувати задані експлуатаційні властивості поверхневих шарів різними методами, в тому числі і з використанням комбінованих методів.

Характерною особливістю методів зміцнення є те, що не вдається отримати одночасно підвищення властивостей деталей для всіх режимів

експлуатації. Один і той же матеріал покриття, але нанесений різними способами, дає різні робочі параметри.

В даний час в методології нанесення покриттів розрізняють два напрямки:

- створення багат шарових покриттів включаючи мультиплікаційні;
- створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині.

Для технологічної реалізації цих напрямків спостерігаються такі тенденції: розвиток комбінованих методів, і нанесення багат шарових, багатофункціональних покриттів.

Основний недолік комбінованих (багатоопераційних) технологій - це їх складність, суворе дотримання технологічних вимог на всіх етапах, що робить неординарною постановку завдань оптимізації конструктивних схем і технологічних режимів їх нанесення.

Тому побудова нової методологічної схеми дозволяє проводити оптимізацію технологічних схем отримання покриттів за критеріями їх експлуатаційної міцності, довговічності і стійкості в різних середовищах є дуже затребуваною науковою проблемою.

Деталь D , поверхня якої Π характеризується сукупністю (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, пористість, зносостійкість, 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 перекладу 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 багатофункціональних 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 $K(\dots, \{P_0, P_k\})=1$, проводимо вибір параметрів $(q_1^{z_i}, \dots, q_x^{z_i})$, 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^* , $P^* \in P$.

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.

Математична формалізація і постановка задачі забезпечення заданих властивостей поверхневих шарів деталей в умовах їх відновлення, а також сукупність базових мінімізуючих функціоналів, які дозволяють встановлювати необхідні параметри і послідовності багатоопераційних технологій, що забезпечують задані властивості відновлюваних поверхонь.

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, які представлені у вигляді схеми системних взаємозв'язків при формуванні процесу ремонту (рис. 2.3).

В основу покладено вивчення кожного елементу 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.

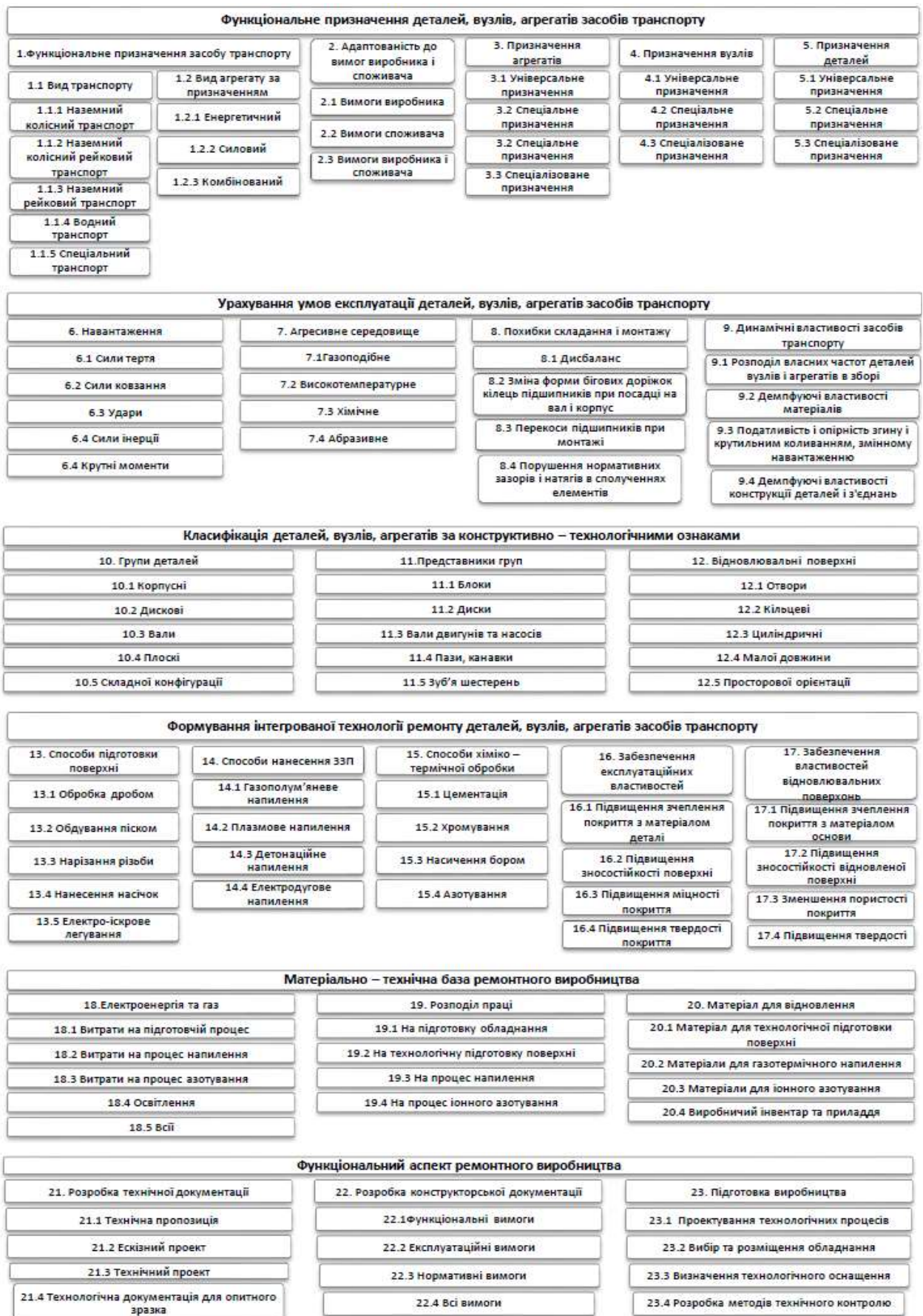


Рисунок 2.3 - Схема структурних взаємозв'язків морфологічної матриці в процесі ремонту

Електроіскрове легування				
24. Інструмент	25. Тип контакту інструменту	26. Матеріал електроду	27. Параметри процесу	28. Функціональне призначення
24.1 Вібраційні збуджувачі	25.1 Детермінантний	26.1 Тверді сплави	27.1 Імпульс робочого струму	28.1 Зміцнення та легування відновлюваної поверхні
24.2 Багатоелектродні головки	25.2 Статичний	26.2 Хром	27.2 Тривалість обробки	28.2 Підвищення зносостійкості відновлюваної поверхні
24.3 Легуючий електрод	25.3 Змішаний	26.3 Ніхром	27.3 Матеріал електроду	28.3 Підвищення корозійної стійкості відновлюваної поверхні
		26.4 Молибден	27.4 Сила робочого струму	28.4 Підготовка відновлювальної поверхні
		26.5 Нікель	27.5 Частота розряду	
		26.6 Композиційні матеріали	27.6 Всі складові	

Електродугове напilenня			
29. Інструмент	30. Матеріал дроту	31. Параметри процесу	32. Функціональне призначення
29.1 Ручний	30.1 Дріт зі сталей аустенітного класу	31.1 Швидкість розпилення	32.1 Забезпечення пористості
29.2 Переносний	30.2 Дріт зі сталей мартенситного класу	31.2 Потужність електричної дуги	32.2 Підвищення зносостійкості
29.2 Стационарні	30.3 Порошковий дріт	31.3 Витрата газу, що розпилюється	32.3 Витривалість контактні навантажень
		31.4 Склад горючої суміші	32.4 Підвищення мікротвердості
		31.5 Відстань від сопла до поверхні	
		31.6 Всі складові	

Імпульсне іонне азотування	
33. Параметри процесу	34. Функціональне призначення
33.1 Час дифузійного насичення	34.5 Зниження ймовірності пластичної деформації деталі в умовах контактного навантаження
33.2 Тиск реакційного газу	34.6 Підвищення межі витривалості
33.3 Склад реакційного газу	34.7 Відновлення поверхневої твердості деталі після ремонту без деформацій і викривлення
33.4 Температура газу	34.8 Всі параметри
33.5 Всі параметри	

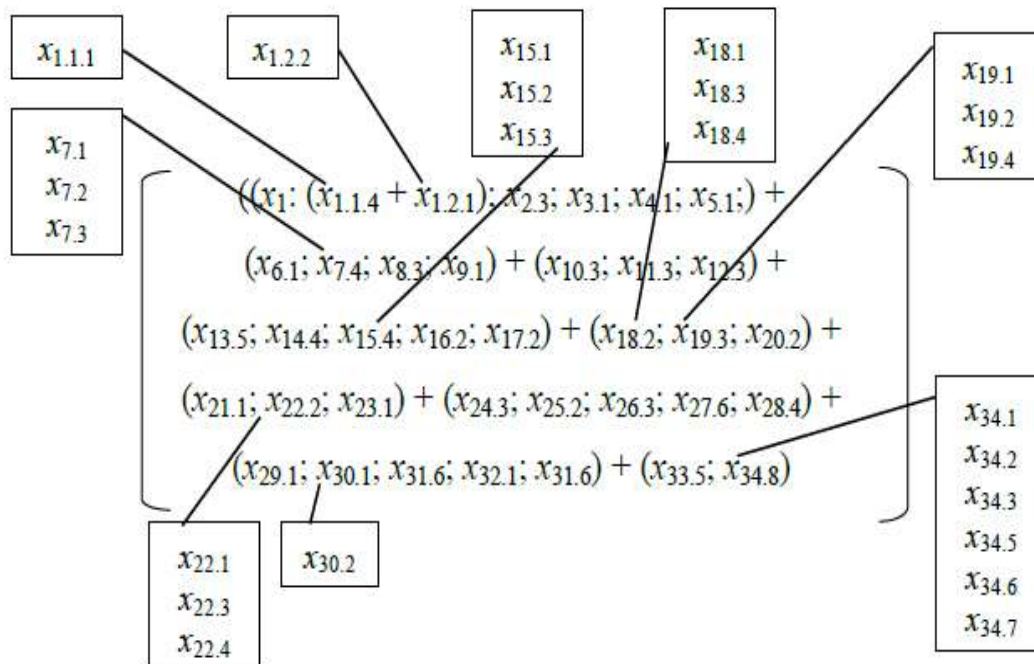


Рисунок 2.3 - Схема структурних взаємозв'язків морфологічної матриці в процесі ремонту (продовження)

2.3 Математичний опис і розробка математичних моделей технологічного процесу відновлення

Неадитивний вплив на деталі ЗТ експлуатаційних факторів представляє собою складний процес, який залежить від величини цих факторів. У зв'язку з цим доцільно досліджувати відновлювані поверхні з багатофункціональними покриттями в умовах одночасної дії факторів від мінімального до максимального їх значення. При вирішенні таких складних задач, для скорочення об'єму необхідних експериментальних робіт та отримання максимальної інформації з проведених досліджень, слід використовувати методи математичного планування експерименту.

Сучасна методологія проведення науково – експериментальних досліджень пропонує використання всього комплексу методів експериментально – статистичного та обчислювального експерименту, дослідження характеристик адгезійної міцності, зносостійкості, межі витривалості, рентгеноструктурних та металографічних досліджень. Ці методи дають можливість визначити оптимальні технологічні режими ТП відновлення за допомогою яких можна одержати відновлені поверхні з багатофункціональними покриттями із заданими властивостями та забезпечити співвідношення характеристик адгезійної міцності і зносостійкості в композиції «покриття – відновлена поверхня» як можна ближче до оптимального, а саме максимальну міцність та зносостійкість. Тобто технологію відновлення шляхом використання багатофункціональних покриттів слід розглядати як спосіб управління властивостями відновленої поверхні КЕ деталей ЗТ. При цьому конструювання системи типу «відновлювана поверхня – покриття» базується не тільки на співвідношенні властивостями цієї системи з умовами експлуатації, а також на співвідношенні властивостей покриття з властивостями матеріалу відновлюваної поверхні деталі ЗТ.

Завдяки можливості управління параметрами процесу відновлення

шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом, який включає ЕІЛ, ЕДН і ПА, для дослідження ТП відновлення вибрано метод багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних, який дозволяє представити ТП у вигляді функціональної залежності вхідних та вихідних параметрів.

Математичне моделювання включає такі етапи [23, 306 – 312]: вибір керованих параметрів і рівнянь варіювання їх значень; вибір критеріїв оптимізації; побудову робочої матриці проведення досліджень; побудову математичних моделей за результатами проведених досліджень; проведення статистичного дослідження цих моделей і обчислювального експерименту; проведення оптимізації [306].

Для комплексної оцінки властивостей відновлюваних деталей ЗТ з багатофункціональними покриттями, отриманими комбінованим методом, завдання оптимізації технологічних режимів розглядається як багатофакторне з урахуванням конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів і багатокритеріальне з використанням декількох критеріїв (комплексу механічних, фізичних і експлуатаційних властивостей) [307, 308]. Такий підхід дає можливість уявити процес відновлення у вигляді функціональної залежності вхідних і вихідних параметрів. Ця залежність визначає оптимальні технологічні режими, які забезпечують максимальні (мінімальні) значення вихідних параметрів (властивостей відновлених деталей з покриттями).

З урахуванням математичного моделювання [23, 303, 304, 313, 314 – 316], побудова плану експерименту проведено відповідно до рекомендацій, представленими в роботах Ю.П. Адлера, В.І. Барабашука, М.С. Винарського [317, 318 – 320]. Був використаний план експерименту, згенерований на основі ЛП_τ – чисел, математичний апарат яких розробив І.М. Соболев [306]. План експерименту, згенерований на основі ЛП_τ – чисел мають ряд переваг [304]: є планом пошуку оптимальних умов і дозволяє більш глибоко аналізувати досліджувану область; його властивості при «випаданні» одного

з експериментів погіршуються в межах, які дозволяють його використовувати; може бути використаний як послідовний план (попередні результати об'єднуються з подальшими).

Конструювання плану експерименту проведено за допомогою пакету прикладних програм (ППП) ПРИАМ [309, 310]. У ППП ПРИАМ реалізована спеціально розроблена адаптивна процедура, яка є частиною технології і має високу ефективність [309, 310]. Адекватність, відтворюваність та інформативність моделі оцінювали G-критерієм Кохрена, F – критерієм Фішера, критерієм Стьюдента, коефіцієнтом кореляції R [22, 23, 303, 304].

Експерименти проводили відповідно до генерованої робочої матриці плану. Після проведення експериментів було виконано аналіз результатів, розраховані середні значення відгуку і дисперсія по кожному експерименту. Проведення натурного експерименту в усіх точках факторного простору не завжди можливо. В такому випадку фізичний об'єкт замінюється математичною моделлю (2.1) – (2.2, 2.3, 2.9) [303 – 312].

Для визначення найкращої точки використовували функцію ППП ПРИАМ «багатопараметрична оптимізація» [309, 310]. Визначення рангів і вагових коефіцієнтів критеріїв оптимізації проводили за допомогою методу експертних оцінок. Експерти оцінювали їх важливість, порівнюючи між собою [307 – 312]. Перевірка вагових коефіцієнтів на предмет їх узгодженості проведена відповідно до рекомендацій роботи [307]. В якості критеріїв багатокритеріальної оптимізації застосовували комплекс механічних і експлуатаційних властивостей відновлених поверхонь з багатофункціональним покриттям, їх геометричні параметри. Вхідними змінними служили конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори.

2.3.1 Математичне моделювання

Реальний ТП відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів дуже складний, а явища, що його супроводжують, надзвичайно різноманітні. Тому, при побудові математичної

моделі ТП відновлення зазвичай обмежуються схематичним (спрощеним) уявленням об'єкту дослідження у вигляді «чорного ящика» (рис. 2.4), в основі якого лежить ідея Н. Вінера [23, 321].

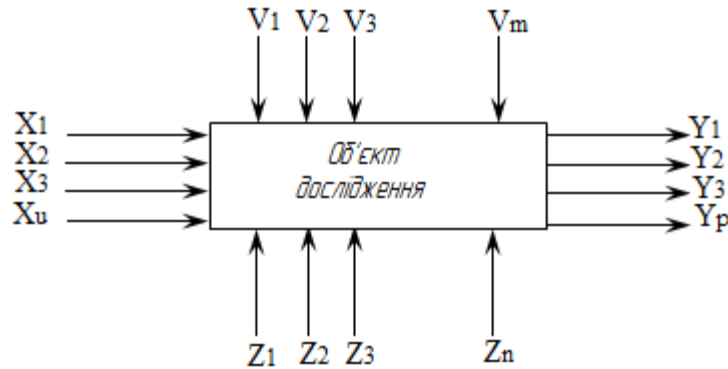


Рисунок 2.4 – Схематичне представлення об'єкту дослідження

На вхід об'єкта поступають вхідні параметри (фактори), а на виході отримують значення параметрів, що характеризують стан об'єкту дослідження. На такий об'єкт впливають чотири групи факторів [307, 308]:

1) група факторів $X = (X_1, X_2, X_3 \dots X_u)$, що називаються вхідними, або незалежними змінними параметрами, що контролюються. Вони допускають цілеспрямовану зміну в ході дослідження. До них відносяться конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори;

2) група $V = (V_1, V_2, V_3 \dots V_m)$, яка включає в себе фактори, що контролюються, але не допускають цілеспрямованої зміни в ході експериментальних досліджень. До них можна віднести умови оточуючого середовища: температура, вологість, тиск, тощо;

3) група факторів $Y = (Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_p)$, що називаються вихідними (критеріями оптимізації). До них відносяться величини, що характеризують властивості відновленої поверхні деталі з багатофункціональними покриттями (адгезійну міцність, зносостійкість, межу витривалості, мікротвердість, пористість, тощо);

4) група $Z = (Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n)$ утворена факторами, що контролюються і

не управляються. Вони характеризують об'єкт, і, які неможливо виміряти кількісно: домішки в реакційному газі, старіння конструктивного матеріалу тощо.

Математичною моделлю об'єкту дослідження, що зображено на рис. 2.4 може бути сукупність співвідношень виду [23, 302 – 304, 314, 315]:

$$Y=f(X_i, V_j, Z_k) \quad (2.1)$$

де Y – вихідний параметр (критерій оптимізації);

X_i – сукупність значень вхідних параметрів, що контролюються й керуються;

V_j – вхідні параметри, що контролюються, але не управляються;

Z_k – вхідні параметри, які не справляються і не контролюються.

При побудові моделі такі співвідношення отримати неможливо [23, 478, 479]. Тому, приходиться вводити обмеження, тобто кожний з параметрів може змінюватися у визначених межах (X_{iB}, V_{jB}, Z_{kB}):

$$X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}, V_{jH} \leq V_j \leq V_{jB}, Z_{kH} \leq Z_k \leq Z_{kB} \quad (2.2)$$

Вихід хоча б одного з параметрів за ці межі приводить до порушення ходу ТП відновлення. Задача полягає в тому, щоб при фіксованих параметрах $V_j = \text{const}$ і $Z_k = \text{const}$ вибрати такі значення $X_i = \text{var}$ (таку робочу точку в області працездатності D), при яких вихідний параметр (або параметр оптимізації) об'єкту Y досягає оптимальної величини. Іншими словами, необхідно оптимізувати функцію

$$Y = f_{\text{opt}}(X_i = \text{var}; V_j = \text{const}; Z_k = \text{const}), \quad (2.3)$$

при $X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}$

Статистичною математичною моделлю об'єкту є функція відгуку, що пов'язує параметр оптимізації Y , який характеризує результати експерименту, із змінними параметрами, якими варіюють при проведенні досліджень:

$$Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (2.4)$$

Незалежні змінні X_i прийнято називати факторами, координатний простір із координатами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ – факторним простором, а геометричне зображення функції відгуку у факторному просторі – поверхнею відгуку. При досить обмежених знаннях про механізм методу відновлення аналітичний вираз функції відгуку невідомий. Тому функції відгуку представляють поліномом [304]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i>1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i<jj<1}^k b_{ijl} X_i X_j X_l, \quad (2.5)$$

де Y^* – розрахункове значення параметру оптимізації; b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – вибіркові коефіцієнти, які можна отримати методами регресивного аналізу, використовуючи результати експерименту.

Таким чином, побудова математичної моделі є необхідним елементом експериментального дослідження. Подальший крок – використання математичної моделі для отримання загальних закономірностей, що пов'язані з процесом відновлення, який досліджується.

Планування експерименту відноситься до статистичного методу ідентифікації складних систем [322 – 325]. Вирішення задачі щодо побудови математичної моделі способу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів необхідно проводити за наступними етапами [304]: формалізація задачі; конструювання плану експерименту; проведення експерименту; попередній статистичний аналіз результатів

експерименту; побудова математичних моделей за результатами експерименту; аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту з використанням побудованих моделей; формування висновків та рекомендацій.

Виконання вказаних етапів побудови математичної моделі способу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів необхідно для обробки інформації при вирішенні задач моделювання та оптимізації. Від організації цього процесу та засобів, що використовуються, в значній мірі залежить кінцевий результат: достовірність, якість, повнота, об'єм інформації та її собівартість (розмір витрат). Мета організації такого процесу – отримання максимальної кількості достовірної інформації при обмеженнях на ресурси, що для цього використовуються [5, 22, 23, 304, 326 – 328].

Особливістю методу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом є те, що при вирішенні складних задач, неправильне виконання задач на перших етапах неможливо виправити на послідуєчих етапах, тому на кожному етапі необхідно використовувати найбільш ефективні з точки зору отримання кінцевого результату засоби їх реалізації [5, 22, 23, 302 – 304].

Формалізація – формування прикладної задачі дослідження методу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів за критеріями адгезійної міцності та зносостійкості. Формалізація включає: визначення прикладної мети дослідження, аналіз і структурування об'єкту дослідження, вибір засобів і методів рішення, визначення необхідних ресурсів.

Визначення прикладної мети досліджень полягає в пошуку оптимальних технологічних режимів відновлення, що забезпечать підвищення експлуатаційних характеристик ЗТ та їх елементів за допомогою обчислювального експерименту.

Аналіз й структурування об'єкту дослідження необхідно виконувати з

метою вибору критеріїв оптимізації, складання переліку незалежних змінних (факторів) і визначення складу контрольованих некерованих та керованих змінних і рівнів варіювання та фіксації для некерованих змінних. Оптимізація методу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів проводиться за результатами експериментальних досліджень системи «відновлювана поверхня – покриття», де метою певного критерію оптимізації є мінімум або максимум. В результаті аналізу та структуризації об'єкту дослідження заповнюються таблиці, що включають назви змінних, її одиниці виміру та значення рівнів варіювання.

Необхідні ресурси в значній мірі залежать від числа дослідів. Результатом дослідів є остаточний вибір рівнів варіювання незалежних змінних і видача завдання на генерацію плану у виді виразу [304]:

$$2^{k_1} \times 3^{k_2} \times 4^{k_3} / N, \quad (2.6)$$

де k_1, k_2, k_3 – число змінних, що варіюються відповідно на рівнях 2,3...n;

N – кількість дослідів

Для практичних цілей пропонується використовувати табл. 2.1 [304].

Таблиця 2.1 - Залежність кількості дослідів від факторів варіювання

Кількість факторів	Кількість експериментів
до 4	8
5 – 8	16
9 – 16	32
17 – 24	64
25 – 33	128

Після проведення формалізації виконується конструювання плану експерименту [304]. Від плану експерименту залежить об'єм інформації, яку можливо отримати, її якість та надійність, а також зусилля, які необхідно

затратити на її отримання. Плани експерименту повинні для структури рівняння регресії забезпечувати отримання стійкої, інформативної і адекватної математичної моделі. Цим вимогам задовольняють робастні плани експерименту.

У даній роботі пропонується використовувати план експерименту, що згенерований на основі ЛП_τ – чисел [304, 308]. Вихідні дані для генерації матриці плану експерименту (матриці пробних точок): N – максимальна кількість пробних дослідів, яка може бути проведена на даному кроці оптимізації; M – кількість факторів (незалежних змінних), що впливають на критерії якості; NFI [M] – масив числа рівнів варіювання за кожним фактором; FN [K, M] – таблиця опису кодованих значень рівнів факторів. Кожен рядок матриці пробних точок XW – умова одного пробного дослідів. Матриця XW будується за наступним алгоритмом.

Крок 1. Побудова матриці пробних точок з N дослідів для M змінних, що змінюються на відрізку [0, 1]. Розрахунок значень здійснюють за наступною формулою [304, 312]:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^m 2^{-2k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m \left[2 \{i2^{-l}\} \right] \times \left[2 \{r_j^{(l)} \times 2^{k-l-1}\} \right] \right\}, \quad (2.7)$$

де $m = 1 \left[\frac{\ln i}{\ln 2} \right]$; $[\cdot]$ – добуток цілої частини числа; $\{\cdot\}$ – добуток дробової частини числа; $r_j^{(l)}$ – значення з таблиці опорних чисел; i – номер експерименту; j – номер змінної

Крок 2. Переведення одержаної матриці XW з кодованих змінних до натуральних. Після переведення всіх точок робота алгоритму завершується.

Отриманий за допомогою ППП ПРІАМ [304, 309, 310, 312] план експерименту представляє собою матрицю, кожний рядок якої містить кодовані значення незалежних змінних для кожного рівня. Для планів на базі ЛП_τ – чисел кодовані значення рівнів представляють собою десятковий дріб в

інтервалі від 0 до 1. Для цих планів перехід від кодованих значень до натуральних здійснюється за формулою:

$$X_{ij} = X_{\min j} + Q_{ij} \times (X_{\max j} - X_{\min j}), \quad (2.8)$$

де X_{ij} – натуральне значення j – го фактору в i – му досліді; Q_{ij} – кодоване значення j – го фактору для i – го досліді; $X_{\max j}$ – максимальне значення j – го фактору; $X_{\min j}$ – мінімальне значення j – го фактору

При проведенні експерименту треба ретельно його виконувати як з точки зору прикладної області, так і за виконанням вимог статистики. Після визначення необхідної кількості числа експериментів проводиться перша серія експериментів згідно плану, що згенерований на основі ЛП_t – чисел. Після проведення всієї серії експериментів визначається найкраща точка за вибраним критерієм якості. Для визначення найкращої точки використовується функція «багатопараметрична оптимізація» у зв'язку з використанням в дисертаційній роботі декількох критеріїв оптимізації.

Після проведення експерименту виконується статистичний аналіз або обробка результатів, що дозволить відкинути помилки. На цьому етапі розраховується середнє значення відгуку та дисперсії за кожним експерименті. Після цього перевіряється однорідність дисперсій та розраховується дисперсія відтворюваності за допомогою критерія Кохрена. Розрахунок значення критерію Кохрена проводиться за формулою:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (2.9)$$

де S_{\max}^2 – максимальна з дисперсій; S_i^2 – дисперсії, що розраховані в кожному досліді за повторним дослідом по формулі:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}, \quad (2.10)$$

де n – кількість дубльованих дослідів; \bar{Y}_i – середнє значення відгуку в i – му досліді; Y_{ij} – значення відгуку в i – му досліді при j – му повторенні

Отриманий результат порівнюється з табличним, і якщо $G_{\text{розр}} < G_{\text{таб}_{a,n-1,N}}$, то гіпотеза про однорідність приймається і дисперсія відтворюваності розраховується за формулою:

$$S_{\text{відтвор}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(n-1) \times N}, \quad (2.11)$$

де N – кількість дослідів; n – кількість дослідів, що дублюються, в i – й строчці матриці планування; \bar{Y}_i – середнє значення функції відгуку з n дослідів

Якщо дисперсія дослідів неоднорідна, то експеримент необхідно повторити для отримання нормального результату.

Перед тим як почати роботу по побудові моделі, необхідно визначити, чи можливо з отриманих даних встановити яку-небудь закономірність і перевірити та визначити, чи належить дисперсія відносно загального середнього і дисперсії відтворюваності до однієї генеральної сукупності:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{відтвор}}^2}{S^2} < F_{\text{таб}_{a,N(n-1),N-1}}, \quad (2.12)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{N-1},$$

де \bar{Y} – загальне середнє всіх середніх за стовпцем.

Позитивна відповідь на це питання означає, що в наших даних не міститься ніякої закономірності. При такій ситуації хорошу модель, за об'єктивними причинами отримати не вдасться. Тому необхідно знову проаналізувати умови проведення експерименту і саму формалізацію, а після цього провести нові дослідження в змінених умовах, або прийняти цей результат для врахування фактору відсутності статистично значимого зв'язку між незалежними змінними і відгуком для подальшого використання.

Побудова математичних моделей за результатами експерименту проходить у два етапи: вибір структури рівняння регресії та отримання оцінки коефіцієнтів регресії і їх статистичних характеристики.

Під побудовою моделі розуміється побудова лінійної за параметрами регресивної моделі (2.5) за результатами експериментальних даних. Модель повинна бути такою, щоб її дійсно можна було використати для дослідження об'єкту. Тобто вона повинна відповідати об'єкту не тільки за точністю прогнозування результату, а і структура її повинна відображати дійсну структуру зв'язків між незалежними змінними та відгуком.

В ППП ПРІАМ реалізована спеціально розроблена адаптивна процедура визначення структури, що є частиною технології і має високу ефективність [309, 310]. Отримання моделі і її характеристик в ППП ПРІАМ представляє собою двоетапну процедуру.

На першому етапі з початкової безлічі регресорів, що включають всі головні ефекти і всі взаємодії заданих типів, вибирається деяка кількість, яка повинна включати пошукову структуру моделі. Ця кількість вибирається так, щоб регресори, що входять до неї, мали як можна менший статистичний зв'язок один з одним і як можна більший з – відгуком.

На другому етапі за допомогою процедури покрокового регресивного аналізу визначається кінцева структура моделі. Якщо статистичні показники якості отриманої моделі не задовольняють поставленим вимогам, то обидва етапи повторюються до тих пір, поки не будуть досягнуті необхідні показники або виявлена неможливість їх задоволення.

Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводиться за формулами:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u - \bar{Y}_{iu}}{n}, \quad (2.13)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u - \bar{X}_{iu}}{n}, \quad (2.14)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} X_{ju} \bar{X}_u}{n}, \quad (2.15)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії виконується за допомогою критерію Ст'юдента, розрахункове значення якого дорівнює:

$$t_{\text{роз}} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (2.16)$$

де b_i – значення i – го коефіцієнта регресії; S_{b_i} – дисперсія коефіцієнтів регресії

$$S_{b_s} = \frac{1}{N \times n} \times S^2 \quad (2.17)$$

Коефіцієнт вважається значущим, якщо $t_{\text{роз}} \geq t_{\text{табл}}$. Табличне значення критерію вибирається при кількості ступенів свободи $f = N \times (n - 1)$ та рівні значущості α . При $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}}$ гіпотеза щодо незначущості відповідного коефіцієнту приймається. Значення цього коефіцієнту знаходиться на рівні

похибки експерименту і в такому випадку він прирівнюється нулю і його не включають в рівняння регресії.

Аналіз якості отриманої моделі проводиться з метою визначення придатності її для використання. Обов'язково необхідно перевірити такі властивості як інформативність, адекватність та стійкість моделі. Найбільш часто оцінкою інформативності є величини множинного коефіцієнта кореляції R (коефіцієнт кореляції між експериментальним значенням відгуку й значенням відгуку, що розрахований за моделлю). Чим ближче він до одиниці, тим інформативність моделі вища. Величина R^2 представляє собою:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}, \quad (2.18)$$

де \hat{Y}_i – значення функції відгуку, що розраховане для i – го дослідження за моделлю

Емпірично встановлено [304, 318], що величина R повинна бути не менше 0,96 – 0,97. Але це не є необхідною і достатньою умовою. Достатньою умовою є перевірка значимості коефіцієнту множинної кореляції за критерієм Фішера:

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{\text{зал}}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{\text{зал}}}, \quad (2.19)$$

де $V_R, V_{\text{зал}}$ – представляють собою ступені свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю і залишковою дисперсією відповідно:

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{(k-1)}, \quad S_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y})^2}{(N-1)} \quad (2.20)$$

де k – кількість членів моделі

Якщо розрахункове значення більше табличного із заданим рівнем значимості, то модель інформативна. Така перевірка інформативності є якісною. Для того щоб оцінити рівень інформативності кількісно, можна використати критерій Бокса-Веца. Значення γ критерію повинно бути не нижче, ніж 2...3 і визначається з наступного рівняння:

$$F_0 \cong (1+\gamma) \times F_{a, V_R, V_{\text{зал}}}, \quad (2.21)$$

де
$$V_0 = \frac{V_R (1+\gamma)^2}{1+2\gamma^2}$$

Перевірка адекватності одержаної моделі зводиться до перевірки за критерієм Фішера [304, 305, 318]. При цьому порівнюються дисперсії адекватності й відтвореності. Розрахункове значення критерію визначається за формулою:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} \quad (2.22)$$

де $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсія адекватності

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n}{N-1} \times \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$$

де l – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Табличне значення критерію адекватності вибирається при ступені свободи чисельника $f_1 = N - 1$, знаменника $f_2 = N - l$ та рівня значимості $\alpha = 0,05$. Якщо $F_{\text{роз}} \leq F_{\text{табл}}$, то можна вважати, що модель адекватно описує процес, що досліджується. У протилежному випадку – модель неадекватна й потрібні неформальні дії для одержання адекватної моделі. Для цього можна перейти від лінійної моделі до моделі, в якій враховується не лінійність у вигляді добутку факторів:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j \quad (2.23)$$

потім до моделі другого порядку:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2 \quad (2.24)$$

Якщо цього не досить, то можна змінити шкалу вихідної величини Y , або збільшити ступінь поліному за допомогою ортогональних поліномів Чебишева та за допомогою плану третього порядку. Можна також провести новий експеримент, змінивши діапазони області допустимих значень вхідних параметрів x_i , $i = 1, 2, \dots, k$.

Стійкість в ППП ПРИАМ не перевіряється, тому, що це вимагає проведення розрахункового експерименту, який вимагає часу більше, ніж сама побудова моделі. Разом із тим, виконується розрахунок ряду непрямих критеріїв, які дозволяють зробити висновок про стійкість структури та оцінку коефіцієнтів. При аналізі стійкості розглядається таблиця мультиколінеарності та числа обумовленості, яка складається з: імен регресорів, що входять у модель;

максимальної за абсолютної величини коефіцієнта парної кореляції, який даний регресор має з іншими регресорами, що входять у модель; імені регресора; коефіцієнта кореляції з відгуком. Таблиця мультиколінеарності дозволяє проаналізувати стійкість структури рівняння регресії. Для цього бажано, щоб виконувалися наступні умови: максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не перевищував би за абсолютною величиною 0,3 – 0,4; коефіцієнт парної кореляції з відгуком за абсолютною величиною повинен бути істотно більшим ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

Проведення розрахункового експерименту представляє собою безпосереднє використання моделі для вивчення проектуемого процесу

відновлення комбінованим методом нанесення багатofункціональних покриттів. При цьому фізичний об'єкт замінюється побудованою моделлю. Для пошуку найоптимальнішої точки на основі експериментальних даних будуються багатofакторні математичні моделі критеріїв якості. За цими моделями та результатами проводиться багатopараметрична компромісна оптимізація.

Під час розв'язання задач багатopараметричної оптимізації вирішується проблема вибору важливості критеріїв оптимізації і призначення їм рангів та вагових коефіцієнтів. Це пов'язано з тим, що деякі критерії оптимізації можуть бути більш важливими, а деякі менш. Величина вагових коефіцієнтів значно впливає на результати багатокритеріальної оптимізації. Процедура визначення рангів та вагових коефіцієнтів полягає в використанні експертних оцінок, згідно яких експерт оцінює важливість критеріїв оптимізації між собою. Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться обробка результатів на предмет їх узгодженості. Ранги визначалися за формулою:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} M_i}{n_i} \quad (2.25)$$

де M_i – місце значимості i – го показника; n_i – кількість експертів в оцінці даного показника

Вагові коефіцієнти визначалися за формулою:

$$K_i = 1 - \frac{P_i - P_{i\min}}{m - 1} \times d \quad (2.26)$$

де P_i – ранг поточного i – го показника; $P_{i\min}$ – ранг i – го показника, що має найважливіше значення; m – кількість показників; d – діапазон зміни вагових коефіцієнтів показників (0,5 – 1); K_i – ваговий коефіцієнт i – го показника

Для перевірки узгодженості висновків експертів використовується

коефіцієнт конкордації, запропонований свого часу Кендалом [304, 318]:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \left(R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \quad (2.27)$$

де n – кількість параметрів (об'єктів), що оцінюють експерти; m – кількість експертів; R_{ij} – ранг j – го об'єкта (параметра), призначений i – м експертом

Для перевірки статистичної значущості вибіркового значення коефіцієнта конкордації користуються величиною $\chi^2_{\alpha;n-1} - \alpha$ – процентна точка χ^2 – розподілу зі ступенями вільності $(n - 1)$, її беруть з таблиці [304, 318]. Наближене значення $\chi^2_{\alpha;n-1}$ – розподіленої величини дорівнює $m \times (n - 1) \times W$. Якщо станеться так, що умова $m \times (n - 1) \times W > \chi^2_{\alpha;n-1}$ виконується, то гіпотеза про відсутність рангового множинного зв'язку між оцінками експертами параметрів має бути відкинута.

Якщо задано кілька критеріїв оптимізації, то їх спільні значення вибирають використовуючи принцип компромісу за Парето [308, 312]

$$Y[x_1, x_2, \dots, x_k] = Y[y_1 = \min, y_2 = \max, \dots, y_k = \min] = \text{opt} \quad (2.28)$$

де Y – узагальнений критерій оптимальності об'єкту оптимізації, одержаний шляхом використання принципу компромісу за Парето

Ідея компромісу за Парето полягає в пошуку умов функціонування системи, при яких узагальнений критерій її оптимальності досягає екстремального значення [312].

При оптимізації використовували метод випадкового пошуку на основі ЛП_τ рівномірно розподілених випадкових точок [304, 308, 312]. Причинами такого вибору: метод випадкового пошуку дозволяє знайти глобальний екстремум, а не локальний, як усі інші методи; із зростанням числа ітерацій він сходиться, що в інших методах не гарантовано; його ефективність не залежить від форми поверхні відгуку; на функцію не накладаються ніякі

обмеження, крім можливості обчислювати її.

При ЛП_τ пошуку пробні точки в багатомірному просторі розміщені найкращим чином з точки зору зондування цього простору. Алгоритм пошуку оптимальної точки у факторному просторі виглядає таким чином [304, 308, 312]:

- розрахунок значень критеріїв за моделями на основі одержаної матриці натуральних значень;
- розрахунок узагальненого критерію оптимізації $y_{узаг}$.

$$y_{узаг} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jr}]^2 \times W_j^2}, \quad (2.29)$$

де $y_{узаг}$ – значення узагальненої цільової функції для r – го опиту експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ($y_{узаг} \rightarrow 0$) і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1; D_{jr} – зведене до інтервалу 0 – 1 значення j – го відгуку (критерію оптимізації) у r – му досліді експерименту; W_j – вага j – го критерію оптимізації (відгуку); m – кількість критеріїв якості (відгуків).

Значення D_{jr} обчислюють за допомогою формул [496]:

- метою j – го критерію оптимізації (відгуку) є максимум:

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}, \quad (2.30)$$

де $y_{j\max}$ і $y_{j\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j – го критерію якості (відгуку) серед N дослідів (пробних точок);

- метою j – го критерію оптимізації (відгуку) є мінімум:

$$D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}, \quad (2.31)$$

– пошук найменшого значення, обчисленого у кожній пробній точці узагальненого критерію оптимізації, якому відповідає максимальне значення $u_{\text{ефект}}$ ($u_{\text{ефект}} = 1 - u_{\text{узаг}}$). Точка факторного простору, якій відповідає найменше значення узагальненого критерію оптимізації, є оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень є оптимальним значенням параметрів (факторів), що впливають на технологічний процес відновлення.

2.3.2 Вибір і обґрунтування критеріїв оптимізації

Розробка методу пов'язана з вирішенням задач щодо його оптимізації. Це пояснюється тим, що значна кількість технологічних параметрів у сполученні із широкою номенклатурою матеріалів, із яких формують відновлювані поверхні з покриттям, дають широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень буде залежати від наявності необхідних критеріїв оцінки працездатності системи «відновлювана поверхня – покриття» у заданих умовах експлуатації.

В теорії планування експерименту до критеріїв оптимізації пред'являються вимоги, виконання яких необхідне для успішного вирішення задачі. Вибір критеріїв оптимізації повинно базуватися на чітко сформульованій задачі, на видимому розумінні кінцевої мети дослідження. Гуд Г.Х. та Макол Р.Е. [302 – 304, 306 – 308] стверджують, що правильний вибір критерію оптимізації еквівалентний правильному формулюванню задачі. Отже, критерії оптимізації повинні відповідати наступним вимогам [302 – 304, 306 – 308]: мати фізичний зміст і досить повно характеризувати процес, що досліджується; бути відтвореними, тобто при повторенні дослідів у однакових умовах отримані значення повинні збігатися з точністю до помилки експерименту; кожному значенню незалежних змінних повинно відповідати одне значення відгуку; мати вимірювані значення при будь – якій комбінації обраних рівнів факторів, задаватися одним числом та допускати зміну при будь якій можливій комбінації вибраних рівнів варіювання.

В галузі ремонту транспорту використовується термін конструктивна

або конструкційна міцність матеріалів [330 – 333]. Поняття конструктивної міцності включає параметри (показники), що характеризують не тільки міцність КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ, а і їх конструкції в цілому та експлуатаційні властивості, довговічність (ресурс) і надійність. До показників конструкційної міцності деталей ЗТ можна віднести міцність: при різноманітних видах навантаження (розтягуванні, згинанні, контактних навантаженнях тощо); при лінійному, двох і трьохосьовому напруженому стані з різним характером навантаження (імпульсним, тривалим, стаціонарним або змінним), в тому числі при низьких та високих температурах та в умовах впливу оточуючого середовища (корозійно-ерозійне середовище тощо) [36, 33, 330 – 333]. Конструктивна міцність також залежить від рельєфу та стану відновлюваних поверхонь навантажених деталей ЗТ (шорсткість і мікротвердість) та дії теплових змін (термоциклові навантаження) [47, 330 – 333]. Важливими факторами конструктивної міцності є фізична основа самого матеріалу відновлюваних деталей ЗТ (склад металу або сплаву, його структурний стан), наявність природних порушень суцільності (неметалеві включення та інші дефекти – раковини, пори тощо) [36, 33, 330 – 333]. Отже, всі параметри конструктивної міцності принципово можна віднести до показників надійності КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ. Кожний з параметрів конструктивної міцності у визначених умовах може бути вирішальним та призведе до виходу з ладу ЗТ. За допомогою використання методу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом, який впливає на якість відновлюваного поверхневого шару КЕ вузла або агрегату ЗТ, можна керувати значеннями параметрів його конструктивної міцності. Саме складне – об'єктивна та повна оцінка умов роботи ЗТ й установлення оптимальних співвідношень характеристик міцності та зносостійкості відновлюваних поверхонь із багатофункціональних покриттів, так як інколи ці характеристики бувають суперечливі.

Зношення КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ різного призначення проявляється у вигляді зміни їх геометричних розмірів. На процес зношування впливає природа абразивних частинок та їх концентрація, властивості поверхневого шару відновлюваних деталей ЗТ. Оцінюючи умови роботи найбільш навантажених КЕ ЗТ, необхідно встановлювати одночасний вплив статичних та динамічних навантажень, підвищених температур та агресивного середовища. Відомо [44, 76, 77, 330 – 333], що статичні навантаження викликають розтяг КЕ вузла або агрегату ЗТ. Величина їх залежить від режиму роботи ЗТ. Охарактеризувати ці навантаження, можна дослідивши параметри короткочасної статичної міцності матеріалів, із яких виготовлені деталі ЗТ і матеріалів багатофункціональних покриттів. Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні навантаження [44, 76, 77, 330 – 333]. Швидкість росту зусиль при динамічному навантаженні не забезпечує рівнозначності процесів, що протікають у матеріалі відновлюваної поверхні і матеріалі багатофункціонального покриття, в результаті чого виникають численні порушення структури. При систематичному повторенні навантаження та розвантаження проходить накопичення дефектів структури матеріалу відновлюваної деталі і покриття, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування КЕ ЗТ від втоми [74 – 77]. Установити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна за допомогою високочастотних випробувань на втому, а саме в необхідності визначення значення межі витривалості матеріалу відновлюваної поверхні з багатофункціональним покриттям.

Таким чином, в якості критеріїв оптимізації методу відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів вибрано: адгезійну міцність системи «відновлювана поверхня-покриття»; пористість відновлюваної поверхні з шаром багатофункціонального покриття; межу витривалості відновленої деталі; зносостійкість відновлюваної поверхні деталі з покриттям. Визначена мета та

обмеження критеріїв оптимізації (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Мета та обмеження критеріїв оптимізації

Назва критерію оптимізації	Мета	Позначення	Обмеження
Адгезійна міцність	Максимум	Y_1	–
Пористість	Мінімум	Y_2	–
Межа витривалості	Максимум	Y_3	–
Інтенсивність зношування (зносостійкість)	Мінімум	Y_4	–

2.3.3 Вибір керованих факторів та побудова плану експериментальних випробувань

При визначенні керованих факторів були розглянуті всі існуючі групи факторів, що можуть здійснювати вплив на технологічний процес (рис. 2.2). Вибираючи фактори (група X), враховувалася область, що обмежує їх можливе варіювання, а також їх розмірність. Ступінь точності математичної моделі визначається діапазоном їх зміни.

Для кожного i – го фактору встановлювалися наступні значення:

- x_{i0} – основний рівень фактору;
- x_{imax} , x_{imin} – верхній та нижній рівні i – го фактору, що застосовуються під час дослідження;
- Δx_i – інтервал варіювання.

Для факторів, що не входять у математичну модель ТП відновлення (групи факторів V і Z) встановлено рівні фіксації.

Важливою вимогою, що висувається до керованих факторів є відсутність їх взаємозамінності. Крім цього, фактори повинні відповідати наступним основним вимогам: фактори повинні бути керованими (можливість встановлювати й підтримувати необхідні значення в процесі експерименту); фактори не повинні залежати від інших перемінних; сукупність обраних незалежних змінних повинна відповідати вимогам сумісності. Це означає, що в межах заданих границь виміру змінних припустимі будь – які їх сполучення, і це не приводить до небажаних

наслідків (руйнування ЗТ, зміни процесу тощо); інтервал зміни кожного фактору не повинен бути малим, так як при малому інтервалі зміни він може не дати значного впливу на відгук. Небажано встановлювати інтервал, що відповідає вимогам технічних умов або допуску. Разом із тим, інтервал не повинен бути широким, тому що в дуже великому інтервалі процес, що досліджується, може вести себе достатньо складно і для одержання достовірного результату не хватить ресурсів. Рівні варіювання факторів повинні вибиратися з урахуванням інформації про характер впливу на відгук кожної змінної, здатності контрольно – вимірювальної апаратури, методів реєстрації; незалежні змінні повинні бути однозначні, тобто одному значенню незалежної змінної відповідає одне значення відгуку; вибір факторів повинен бути повним.

При виборі керованих факторів до вивчення методу відновлення підходили комплексно, тобто враховувався вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Використовуючи методи експертної оцінки [76, 77, 330] та зробивши серію відсіюючих експериментів отримували середній апріорний ранжируваний ряд факторів, які впливають на метод відновлення шляхом формування багатофункціональних покриттів комбінованим методом (розділі 5). Результати моделювання процесу відновлення шляхом формування багатофункціональних покриттів комбінованим методом, визначення групи факторів, що впливають на величину критеріїв оптимізації, та рівні їх варіювання представлені в розділі 5. Згідно формули 2.5 і рекомендацій, які запропоновані в п. 2.3.2, згенеровано в кодованих значеннях план експерименту, який представляють у виді робочої матриці (розділі 5, додаток Л). Використовуючи формулу 2.6 проведено перехід від кодованих значень до натуральних, що спростило реалізацію плану експерименту (розділі 5, додаток Л). На основі одержаних результатів (розділ 5) був розроблений метод відновлення КЕ деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом. (розділ 6, додаток М).

Таким чином, математичне моделювання процесу відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим методом включає такі етапи [306 – 312]: вибір керованих параметрів і рівнянь варіювання їх значень; вибір критеріїв оптимізації; побудову робочої матриці проведення досліджень; побудову математичних моделей за результатами проведених досліджень; статистичне дослідження цих моделей і проведення обчислювального експерименту; порядок проведення оптимізації [306]. Особливістю описаного процесу моделювання є те, що в ньому відсутні два основних недоліка класичної теорії планування експерименту та регресивного аналізу, які обмежують використання вказаних засобів – планування та обробки моделей заданої структури та обов'язкового використання стандартної області планування.

Результати математичного моделювання процесу відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення покриттів комбінованим методом згідно цих етапів представлені в розділі 5 і в додатку Л дисертаційної роботи. Для комплексної оцінки властивостей відновлюваних деталей ЗТ багатофункціональними покриттями, оптимізація технологічних режимів розглядається як багатофакторна з урахуванням конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів і багатокритеріальна з використанням декількох критеріїв (комплексу механічних, фізичних і експлуатаційних властивостей) [22, 23, 307, 308].

2.4 Висновки до розділу 2

1. Представлено концепцію забезпечення надійності деталей ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів. Розроблені основні принципи формування представленої концепції, показана реалізація концепції на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів

обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

2. Запропоновано загальну методологію роботи, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення наукової проблеми, яка припускає аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально – морфологічний аналіз і розробку системи показників якості, а також математичні описи й моделювання методу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них.

3. Представлено організацію досліджень у вигляді ієрархічної структури методологічних рівнів. Взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу ремонту наведено у вигляді структурної схеми формування покриттів.

Основоположним принципом та передумовою розробки методології забезпечення надійності ЗТ та їх елементів багатофункціональними покриттями, отриманими комбінованим методом, є системність та комплексний характер дослідження показників адгезійної міцності та зносостійкості. Це дозволяє логічно упорядкувати складні процеси дослідження на спільній методологічній інформаційній базі системного підходу, в основі якого лежать відомі принципи моделювання, що визначають основні операції системного дослідження (змістовний аналіз, формалізований опис, дослідження і вибір оптимального варіанту).

4. Для скорочення об'єму експериментальних робіт та отримання максимальної інформації з проведених досліджень, використовували методи математичного планування експерименту, які дають можливість визначити оптимальні режими ТП відновлення та одержати відновлювані поверхні із заданими значеннями адгезійної міцності та зносостійкості.

Таким чином, технологію відновлення шляхом використання багатофункціональних покриттів слід розглядати як спосіб управління

властивостями відновлюваних поверхонь КЕ деталей ЗТ. Такий підхід дає можливість уявити процес відновлення багатофункціональними покриттями у вигляді функціональної залежності вхідних і вихідних параметрів. Ця залежність визначає оптимальні технологічні режими, які забезпечують максимальні (мінімальні) значення вихідних параметрів (властивостей відновлених поверхонь деталей з багатофункціональними покриттями).

Був використаний план експерименту, згенерований на основі $ЛП_{\tau}$ – чисел. Вхідними змінними служили конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори. В якості критеріїв оптимізації ТП відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів вибрано: адгезійну міцність, пористість, межу витривалості та зносостійкість системи «відновлювана поверхня – покриття».

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [5, 22, 23, 33, 36, 44, 47].

РОЗДІЛ 3

ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНА БАЗА, МАТЕРІАЛИ
ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі представлена методологія досліджень, що здійснюються на базі застосування системного підходу до вирішення наукової проблеми, загальна схема досліджень, розроблено технологічну базу для комбінованого методу відновлення КЕ деталей вузлів та агрегатів ЗТ, обґрунтовано вибір обладнання і матеріалів для нанесення багатофункціональних покриттів.

3.1 Загальна методологія досліджень

Методологія науково – експериментальних досліджень [328] передбачає використання технологічної бази та комплексу методів:

- експериментально – статистичного та обчислювального експерименту [303, 305, 313 – 320, 333 – 335, 322 – 326, 329];
- ЕДН [305 – 316], ЕІЛ [348 – 353] та ПА [354 – 359];
- вибору матеріалу для досліджень [360 – 397];
- металографічного і рентгеноструктурного аналізу [398 – 422];
- кількісної стереофрактографічної оцінки морфологічних особливостей поверхонь після ЕІЛ [413 – 430];
- визначення мікротвердості [431 – 438] і пористості ЗЗП [439 – 443];
- дослідження корозійної стійкості відновлених поверхонь [444 – 450];
- оцінки адгезійної міцності ЗЗП і залишкових напружень в них [451];
- дослідження НДС системи «покриття – відновлювана поверхня» з використанням чисельних розрахунків [398 – 405];
- визначення високочастотної витривалості [489 – 497] і зносостійкості відновлених поверхонь з покриттями [496 – 476].

Методика експериментальних досліджень представлена

сукупністю методів виконання поставленої наукової проблеми, а загальна схема досліджень на рис. 3.1.

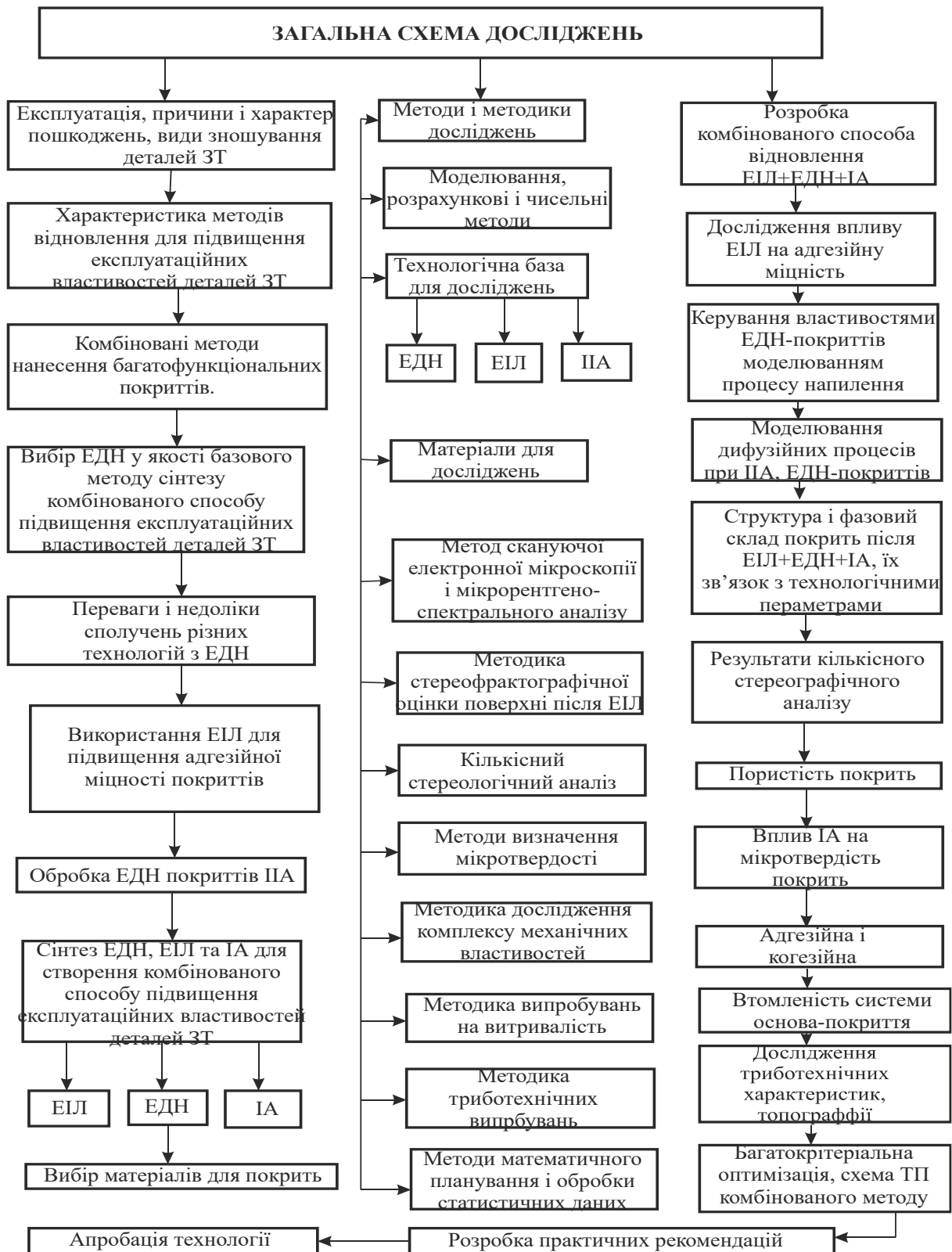


Рисунок 3.1 – Загальна схема досліджень

Комплекс методів досліджень обраний на підставі системного підходу [329] включає в себе:

- методи ЕІЛ, ЕДН і ПА з прогнозованою адаптацією за рахунок керування параметрами та фізико – механічними характеристиками системи «відновлювана поверхня – покриття»;
- методи металографічних і рентгеноструктурних досліджень;
- аналітичні методи механіки деформованого твердого тіла;
- експериментально – розрахункові методи досліджень адгезійної міцності системи «покриття – відновлювана поверхня»;
- чисельні дослідження НДС відновлюваних поверхонь з покриттями;
- дослідження триботехнічних характеристик відновлюваних поверхонь. При проведенні досліджень використовували як стандартні, так і оригінальні методики.

Методи обробки статистичних даних [305, 322 – 325] використані з метою скорочення обсягу експериментальних робіт і отримання максимальної інформації з проведених експериментів [314 – 320, 335].

3.2 Технологічна база для досліджень відновлених поверхонь деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатofункціональних покриттів

3.2.1 Обґрунтування вибору конструкції апарату для ЕДН

Аналіз патентних досліджень і науково – технічних джерел [336 – 347] показав, що розробка обладнання для ЕДН йде по шляху розширення його технологічних можливостей і збільшення ресурсу роботи, підвищення продуктивності і зручності експлуатації, скорочення втрат напилюємого матеріалу і підвищення якості покриттів. Розроблене обладнання для ЕДН дозволяє наносити покриття, які не поступаються покриттям, отриманим плазмовим і детонаційними напиленням. Аналіз технічних характеристик і технологічних параметрів випускається вітчизняного та закордонного обладнання для ЕДН (додаток Д, табл. Д1) показав, що найбільш

переважними з точки зору експлуатації, якості одержаних покриттів і вартості є апарати ЕМ – 12, ЕМ – 14 [309], АДН – 8 і АДН – 10 [294 – 298, 341 – 346] Електродугові апарати випускаються в двох варіантах – ручні і стаціонарні (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики електродугових апаратів

Показник	Марка електродугового апарату			
	ЕМ – 12 стаціонарний	ЕМ – 14 ручний	АДН – 8 стаціонарний	АДН – 10 ручний
Продуктивність розпилювання сталі, кг/г	20,0	10,0	33,0	18,4
Швидкість подачі дроту, м/хв	81 – 4,2	2 – 12	0 – 14	0 – 6,3
Коефіцієнт використання матеріалу (КВМ)	0,70	0,75	0,85	0,85
Робочий струм, А	500	400	500	380
Витрати повітря при 0,6 МПа, м ³ /г	150	90	60	60
Витрати пропан – бутану, кг/г		-	0,011	0,011

Апарати ЕМ – 12 і ЕМ – 14 розроблені співробітниками ФМІ НАН України (м. Львів) та виготовлені в ДМП «Газотермік» [340]. Стаціонарні апарати ЕМ – 12 можна кріпити на супорті токарно – гвинторізного верстата 16К20 (рис. 3.2, рис. 3.3). Змінюючи швидкість обертання шпинделя і відстань між супортом і шпинделем можна регулювати швидкість переміщення електродугового апарату (ЕДН – апарату) щодо поверхні зразка і дистанцію напilenня. Апарати ЕМ – 12 і ЕМ – 14 складаються з приводного механізму, механізму подачі і системи розпилення (рис. 3.2) [340]. У приводний механізм входить електропровід (двигун змінного струму) та одноступінчастий черв'ячний редуктор з горизонтальною приводною віссю. Вихідні кінці осі у верхній частині обладнані роликми, які служать елементами механізму подачі електродних дротів. Притиснення дроту здійснюється пасивними роликми, які розміщені в відкидній кришці ЕДН – апарату. Регулювання притиснення ведеться за допомогою гвинтів в передній кришці. Обидві частини механізму подачі дроту ЕДН – апарату

ізолювані між собою і корпусом. Процес розпилення здійснюється головкою з направляючими наконечниками і соплом, в які подаються два дроти і повітря під робочим тиском (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Процес ЕДН стаціонарним апаратом ЕМ – 12

В основу розпилювальної головки апаратів ЕМ – 12 і ЕМ – 14 покладена закрита схема формування метало-повітряного потоку [340], що забезпечує отримання надзвичайно дрібних фракцій розпилюваних частинок (діаметром менше 50 мкм), які визначаються високою швидкістю польоту. Закриту схему формування метало – повітряного потоку використовують, коли виникає необхідність нанесення дрібнодисперсного покриття (50 – 200 мкм) шляхом розпилення дротів, в склад яких входять тугоплавкі компоненти. Кабелі, по яким подається струм кріпляться до кронштейнів, які розміщені в передній частині ЕДН – апарату (рис. 3.3).

Принцип роботи апаратів ЕМ – 12 і ЕМ – 14 складається в безперервному подаванні двох дротів в головку – розпилювач, де між ними горить дуга (рис. 3.2). Розплавлений матеріал дротів потоком стисненого повітря переноситься на підготовлену ЕІЛ відновлювану поверхню. Товщина напилюваного шару регулюється швидкістю переміщення ЕДН – апарату і числом його проходів щодо поверхні покриття.

Апарати ЕМ – 12 і ЕМ – 14 характеризується наступними параметрами (табл. 3.1): напругою – 18 – 36 В; силою струму – 50 – 600 А; потужністю дуги – 5 – 20 кВт; дистанцією напилення (відстанню від сопла до

відновлюваної поверхні) – 50 – 200 мм; швидкістю поздовжнього переміщення ЕДН – апарату – 5 – 10 мм/об; діаметром дроту – 1,6 – 2,0 мм.



а



б

Рисунок 3.3 – апарати для ЕДН: а – апарат ЕМ – 14 із закритою схемою формування метало – повітряного потоку, б – стаціонарний АДН – 8

Аналіз технічних характеристик і технологічних параметрів обладнання для ЕДН (додаток Д, табл. 3.1, табл. 3.1) [33,341 – 346] показав, що найбільш переважними з точки зору експлуатації, якості отриманих покриттів і вартості є ручний апарат АДН – 10 і стаціонарний АДН – 8 (рис. 3.3) апарати для ЕДН, розроблені в ДНП «ОІМ НАН Білорусі» [294 – 298, 341 – 346].

Апарати АДН поєднують у собі переваги ЕДН і високошвидкісного ГТН [294 – 298, 341 – 346]. В основі роботи апаратів АДН лежить процес плавлення дротів електричною дугою і розпилення розплавленого металу високошвидкісним струменем продуктів згоряння пропано – повітряної суміші [294 – 298, 341 – 346]. Для досліджень використовували апарат АДН – 10 (рис. 3.5, а), так як він є налагодженою конструкцією (додаток Е), а не дослідним зразком. Характеристика апарату приведена в табл. 3.2.

Апарат АДН – 10 має електричний привід, що дозволяє забезпечити необхідну швидкість подачі дротів. У комплект обладнання для ЕДН входить: апарат АДН – 10 (рис. 3.4), який комплектується сполучними кабелями і пультом управління (рис. 3.4, а); електричним блоком управління і блоком комутації; коробкою розподілу; повітряно – силовими шлангами;

високовольтним проводом (рис. 3.4, а). Як джерело живлення використовували зварювальне джерело ВДУ – 506 (рис. 3.4, б).

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики електродугових апаратів з розпиленням дротяних сталей продуктами згоряння пропано – повітряної суміші

Назва	Ручний АДН – 10	Стационарний АДН – 8
Діаметр дроту, мм	1,6 – 2,2	1,5 – 2,5
Швидкість подачі дроту, м/хв.	0 – 6,3	0 – 14
Регулювання подачею дроту	Плавне	Плавне
Електродвигун привода подачі дроту		
номінальна потужність, кВт	0,09	0,09
номінальна частота обертання, хв ⁻¹	8000	8000
Струмопровід на електродні дроти		
напруга, В	17 – 40	17 – 40
максимальний робочий струм дуги, А	100 – 380	100 – 380
Коефіцієнт використання матеріалу (КВМ), не менше	0,85	0,85
Витрати повітря при 0,6 МПа, м ³ /г	60	60
Витрати пропан – бутану, кг/г	не більше 0,011	не більше 0,011
Габаритні розміри	290 × 255 × 75	400 × 170 × 125
Робочий тиск газів, МПа		
пропан	0,3 – 0,45	0,3 – 0,45
повітря	0,45 – 0,8	0,45 – 0,6
Маса апарату, кг	3,1	8,5
Продуктивність по сталі, кг/г	18,4	33

Конструктивні переваги апарату АДН – 10: розпилювальна головка, що швидко замінюється легка і швидка заміна дротів з одного діаметра на інший, висока електрична і термічна захищеність, швидкий доступ до всіх вузлів апарату, прості і швидко замінні елементи для знімання стуму, заміна роликів без розбирання апарату, блочно – вузлове збирання, швидке техобслуговування і ремонт [294 – 298, 341 – 346].

Схема апарату АДН – 10 наведено на рис. Е.1 (додаток Е). Головними його винаходами є розпилювальна головка (поз. 8, рис. Е.1, додаток Е) і підведення струму (поз. 6, рис. Е.1, додаток Е).



а



б



в

Рисунок 3.4 – Комплект обладнання для ЕДН: а) апарат для напилення, камера згорання, дроти; б) повітряно – силові шланги, високовольтні дроти, блок управління; в) джерело живлення ВДУ506

Розпилювальна головка служить для формування струменя розплавленого металу і складається з камери згорання (рис. Е.2, додаток Е), що направляє, і вузлів для підведення стуму (поз. 8 і 9 рис. Е.2, додаток Е). Камера згорання служить для отримання високошвидкісного струменя продуктів згорання (рис. Е.2, додаток Е). Підпалювання суміші здійснюється за допомогою високовольтного розряду, що відбувається між електродами свічки запалювання (рис. В.3, додаток В). Стиснене повітря і горючий газ подають у камеру згорання і змішують в змішувальному пристрої. Охолодження камери згорання – повітряне. Підведення струму до електродних дротів здійснюється від струмо – і – повітряно – підводних шин – шлангів. Блок управління призначений для: управління приводом апарату, регулювання швидкості подачі дроту, підпалу суміші повітря з горючим газом.

В апараті АДН – 10 використовуються відновлювальні транспортуєчі гази з оригінальною подачею через профільовані сопла, камера згорання в

системі подачі газів, підведення струму і розпилюючи сопла, які характеризуються особливим взаємним розташуванням [294 – 298, 341 – 346]. Профільовані сопла забезпечують збільшення швидкості і концентрації потоку, що дозволяє отримувати покриття, відповідні за якістю плазмовим покриттям. Аеродинамічна сила продуктів згорання пропано – повітряної суміші, яка вилітає з камери згорання, розганяє розплавлені частинки до високих швидкостей. Надзвуковий струмінь пропано – повітряної суміші має на виході швидкість 1500 м/с, а швидкість частинок розпилюємого металу – до 500 м/с [294 – 298, 341 – 346].

Особливість ЕДН – апарата – наявність камери згорання пропано – повітряної суміші (рис. Е.2, додаток Е) [7, 33, 294 – 298, 341 – 346]. Пропан має високий коефіцієнт об'ємного розширення (при підвищенні температури на 10 °С тиск в газовому балоні підвищується на 0,6 – 0,7 МПа), а 1 м³ природного газу еквівалентний 1 л бензину. Відсутність кисню в якості окислювача палива знижує собівартість покриттів і підвищує надійність та безпеку роботи. Оригінальна конструкція камери згорання, використання ефективного каталізатора горіння, відсутність водяного охолодження камери і наявність пристрою автоматичного підпалу суміші підвищують надійність ЕДН – апарата.

Відмінність ЕДН – апарата [294 – 298] полягає в тому, що розпилення здійснюється продуктами згорання газоповітряної суміші, що виходить з високою швидкістю (до 500 – 600 м/с) із спеціальної камери згорання, яка оснащена соплом Лавалю [294 – 298]. Використання в якості розпилюємого газу продуктів згорання пропано – повітряної суміші дозволяє знизити окислення напилюємого металу і вигорання легуючих елементів. Однак при однаковому співвідношенні повітря і пропану вуглецю в покритті вдвічі менше ніж у вихідному матеріалі, а при розпиленні повітрям вміст вуглецю зменшується в три рази. Коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) при ЕДН сумішшю пропану і повітря зростає до 0,85 проти 0,75 при ЕДН повітрям, покриття мають пористість 5 – 7 % [294 – 298].

3.2.2 Характеристика установки та інструменту для ЕІЛ

Як правило, покриття, нанесені ЕДН і всіма відомими способами ГТН, далеко не використовують усіх своїх можливостей через когезійний розтріскування або адгезійне відшарування в екстремальних умовах експлуатації. Основною проблемою при експлуатації покриттів є їх руйнування і відшарування. З метою підвищення адгезійної міцності ЕДН-покриттів з відновлюваною поверхнею з метою її попередньої обробки було запропоновано використовувати ЕІО, а саме такий її недолік як шорсткість і таку її перевагу як можливість наносити підшар ЕІЛ.

Шляхом збільшення товщини покриття до 0,2 – 0,5 мм і більше (грубе ЕІЛ) можна збільшити його шорсткість. Вибором кінематичної схеми ЕІЛ можливо отримати необхідну шорсткість покриття. Практика використання методу ЕІЛ показала, що для отримання шарів з високою шорсткістю необхідно вибрати оптимальний технологічний прийом, режим обробки, середовище між електродами, матеріал легуючих електродів. В якості матеріалу електродів доцільно вибирати ніхром або молібден, так як його найбільш часто використовують для нанесення підшару при ЕДН завдяки гарній адгезії до чорних металів [294 – 298].

Таким чином, з огляду на недоліки ЕДН – покриттів, які полягають в когезійному розтріскуванні і адгезійному відшаруванні, метою ЕІЛ є: підвищення працездатності ЕДН – покриттів за рахунок підвищення їх адгезійної і когезійної стійкості.

Процес ЕІЛ реалізували на установці «Елітрон – 22» (рис. 3.6), основними вузлами якої є генератор імпульсів струму (ГІС) і електрона комутуюча система [348 – 353]. Структурна схема установки для ЕІЛ представлена на рис. 3.7.

Електрична частина установки крім генератора (рис. 3.7) складається з блоку автоматичного регулювання відстанню між електродами та блоку управління відносним переміщенням електродів і рухом деталі [348 – 353].

Механічна ..частина установки (рис. 3.7) має електрод, механізми



Рисунок 3.6 - Установка електроіскрового легування «Елітрон – 22»

кріплення і руху деталі, механізми відносного переміщення електродів [348 – 353]. Електрод складається з приводу, механізму передачі руху електродів, струмопроводу і утримувача електроду (механізму кріплення електродів).



Рисунок 3.7 - Узагальнена структурна схема установки для ЕІЛ

Установка «Елітрон – 22», яка має такі характеристики: тип генератора – транзисторно – тиристорний; частота вібрації електрода – 100 Гц; напруга живлення – 220 В; потужність – 0,4 Вт; напруга холостого ходу – 15 – 90 В; робочий струм – 0,5 – 3,0 А; габарити – 450×315×170 мм; маса – 2,2 кг. Вона складається з генератора і вібратора. В установці

використовувався генератор імпульсів струму з ємнісним накопичувачем енергії. Генератор призначений для створення імпульсів струму, живлення обмотки вібратора, контролю та управління ТП [348 – 353].

В установках для ЕІЛ використовуються електромагнітні, електродинамічні і пневматичні збудники [348 – 353]. В установці «Елітрон – 22» використовується електромагнітний збудник [348 – 353]. Збудники створюють вібрації частотою 100 Гц, до 300 Гц і до 1000 Гц і вище. Використання багатофазної вібрації не збільшує частоту коливання кожного електрода, а дозволяє підвищити частотний діапазон роботи генератора за рахунок перерозподілу розрядів між ними.

Електроди, використовувані для ЕІЛ [33, 348 – 353], можна розділити на електроди з детермінованим контактуванням і електроди зі статичним контактуванням. Вібруючі електроди та електроди, які обертаються, відносяться до першого типу, а обертовий електрод торцевого типу та електроди, які використовують вільні електроди, – до другого. Для електродів з детермінованим законом контактування завжди можна пов'язати простими співвідношеннями параметри руху електроду і оброблюваної поверхні, які вказують на форму лінії розташування розрядів на поверхні деталі [348 – 353]. Параметри, розміри і форма електрода істотно впливають на процес формування поверхневого шару і завжди повинні враховуватися при виборі електрода і режиму його роботи [348 – 353]. Аналіз існуючих конструкцій електродів з точки зору руху електрода щодо оброблюваної поверхні (рис. 3.8, а – е) вказує на основні показники, за якими можна аналізувати роботу інструменту:

– кут входу електродів в контакт α і кут виходу з нього β (рис. 3.8, а, б).

Кожна конкретна конструкція електрода-інструменту в процесі його експлуатації забезпечує певні діапазони значень кутів α і β , які залежать від форми перетину електрода, розмірів і форми оброблюваної поверхні, режимів роботи самого електрода. У електродів, які обертаються, торцевого типу кути α і β дорівнюють нулю;

– параметри електродів, що характеризують тривалість контакту τ електродів і шлях контакту l (рис. 3.8, г, д, е). Конструкції електродів реалізують умови їх контакту, які характеризують за допомогою таких критеріїв:

$$L_1 = \frac{l_n}{l_p}; T_1 = \frac{\tau_n}{\tau_p}; L_2 = \frac{l_p}{l_n + l_{k-3}}; T_1 = \frac{\tau_p}{\tau_n + \tau_{r-3}} \quad (3.1)$$

– якщо точку 0 (рис. 3.8, г, д) прийняти за місце початку розряду на осях, то параметри її вказують шлях і час руху електродів при протіканні робочого імпульсу струму $I(t)$ [405].

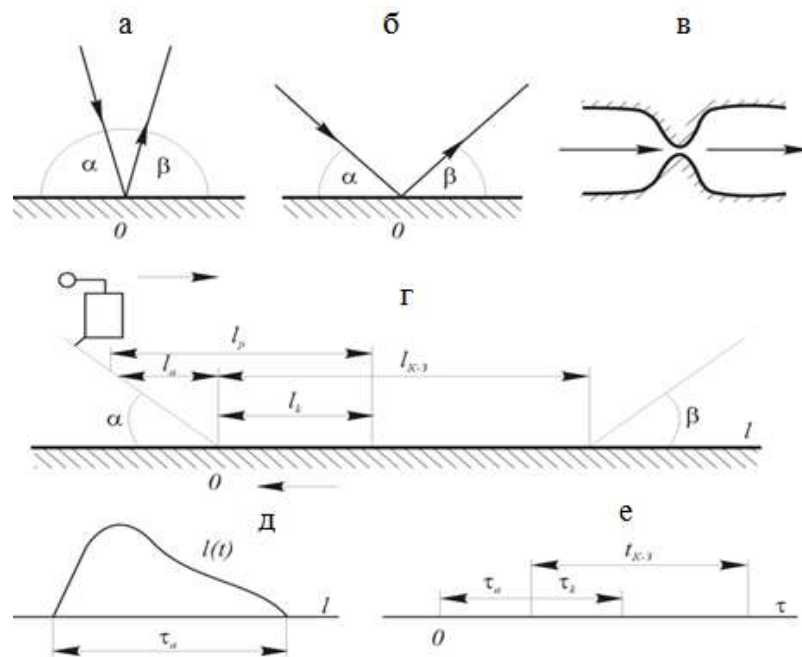


Рисунок 3.8 – Траєкторії контакту електродів при ЕІЛ: а – вібруючий електрод-інструмент; б – електрод інструмент, що обертається; в – електрод-інструмент торцевого типу, що обертається; г – елементи шляху контакту електродів; д – імпульс робочого струму; е – тимчасові інтервали процесу взаємодії електродів

Інтервали шляху і часу l_n, τ_n, l_k, τ_k , при яких імпульси струму реалізуються в умовах проміжку між електродами і контакту між

електродами. Режим контакту для електродів може тривати і після закінчення імпульсу робочого струму. Повний шлях і час руху електродів в короткозамкненому стані відповідно I_{k-3}, τ_{k-3} . Параметри L_1 і T_2 визначають ступінь використання робочого імпульсу струму в режимі, коли розряд протікає в проміжку між електродами, і приймає значення в інтервалі від нуля до одиниці. Параметри L_1 і T_2 характеризують ефективність використання шляху і часу контактування електродів. Їх значення лежать в інтервалі від нуля до одиниці для різних електродів-інструментів і змінюються в процесі їх експлуатації. Параметри α, β, L, T , розміри і форма електродів істотно впливають на процес формування шару покриття на відновлюваній поверхні і повинні враховуватися при виборі електрода і режиму його роботи.

Енергетичний режим установок для ЕІЛ (енергія розряду, частота) при відпрацюванні конкретного ТП вибирають, виходячи з вимог до якості поверхні, яка обробляється [348 – 353]. Режим з великою енергією імпульсів рекомендують використовувати тоді, коли має місце невелика хімічна активність матеріалів (головним чином анода) і немає небезпеки утворення мікротріщин на поверхні катода в результаті впливу на нього імпульсного розряду. Для сплавів, схильних до утворення тріщин, слід використовувати режими з енергією імпульсу не більш 0,2 Дж. [348 – 353]. В роботі розглядали модельну пару «покриття з ніхрому – основа зі сталі».

3.2.3 Устаткування для імпульсного іонного азотування

Азотування зразків з напиленням покриттями розміром $5 \times 5 \times 10$ мм із сталі 40Х13 і 30ХГСА проводили в спеціальній установці (рис. 3.9), розробленої в ІПМіц. імені Г.С. Писаренко НАН України [354 – 359].

На рис. 3.10 представлена структурна схема обладнання для ПА. Установка включає вакуумну камеру, систему вакуумування, систему забезпечення газом, підвіску, систему вимірювання та регулювання температури і тиску, контролери закриття кришки і подачі води, систему

електроживлення, клапани азоту та атмосферного повітря, балон з азотом і повітряний фільтр з повітрязбірником, клапани попередньої і вакуумної відкачки, систему автоматичного управління ТП [355].



Рисунок 3.9 – Установа для іонного азотування в імпульсному режимі

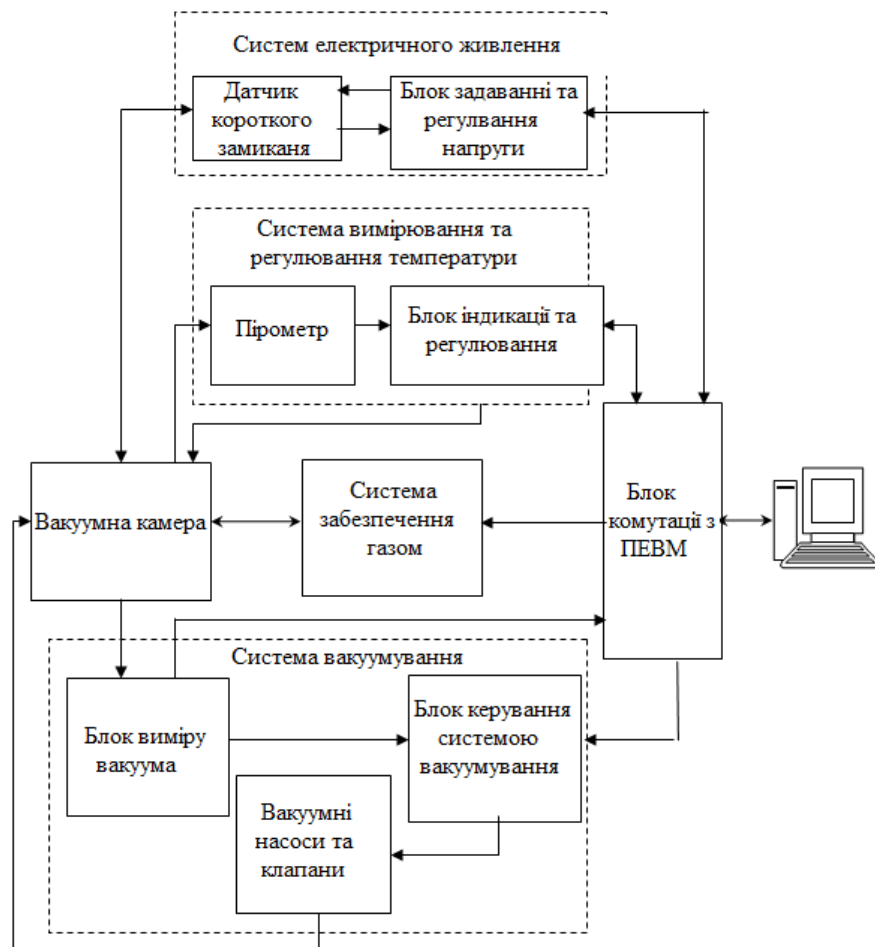


Рисунок 3.10 – Структурна схема обладнання для ІА

Вакуумна камера виконана із нержавіючої сталі з теплозахисним екраном, водяним охолодженням та складається з корпусу і кришки. Завантаження деталей у камеру проводиться зверху за допомогою спеціальної підвіски при піднятій і відведеної в сторону кришці. У корпусі камери є віконця для візуального спостереження за деталями в процесі азотування, а в кришці – віконце для встановлення пірометра. Крім того, в корпусі камери є отвори для створення вакууму, подачі робочої суміші, розміщення струмопроводу. На всіх трубопроводах перебувають вентиля, які входять в вакуумну камеру, і призначені для тестової перевірки систем вакуумування і забезпечення газом [355].

Система вакуумування призначена для створення у вакуумній камері необхідного робочого тиску. До складу системи входять робочий і пусковий насоси, клапани КЗМ – 1 і КЗМ – 2, вимірювальний прилад типу РВЗ – 4, трубопроводи. Робочий насос використовується для підтримки у вакуумній камері протягом усього циклу азотування робочого тиску (вакууму) в сталому режимі. Пусковий насос включається короткочасно спочатку вакуумування камери з метою скорочення тривалості процесу відкачування. Клапани КЕМ – 1 і КЕМ – 2 призначені для аварійного відключення насосів в разі вимикання електроенергії [355].

Система забезпечення газом призначена для подачі в вакуумну камеру газів і газової суміші необхідного складу і якості. Система складається з балонів з робочими газами, редукторів, встановлених на балонах, шлангів для подачі робочих газів і регуляторів. Точне дозування кількості газової суміші, яка подається в вакуумну камеру, відбувається за допомогою регулятора «газ – більше» – «газ – менше». Вимірювання і контроль робочого тиску газової суміші у вакуумній камері здійснюються за допомогою приладу типу РВЕ – 4 [355].

До складу системи вимірювання та регулювання температури входять пірометр і блок індикації та регулювання температури. Інформація про поточну температуру деталі у вакуумній камері подається від пірометра на

блок індикації і регулювання температури, на якому попередньо встановлюються верхнє і нижнє граничне значення температури деталей, що азотуються [355].

Система електроживлення складається з тиристорного регулятора напруги, яка знижується і підвищується за допомогою трансформаторів, випрямляча і датчика короткого замикання. На регуляторі встановлюється максимальне значення напруги і швидкість його росту. Величина вихідної напруги, що подається на деталь, і значення падіння напруги відображаються на індикаторі регулятора напруги. Для стабілізації розряду застосовується пристрій гашення дуги. При переході тліючого розряду в дуговий розряд подається імпульс на замикаючі тиристори. При цьому зменшується напруга, що подається на електроди установки, і виключається перехід аномального тліючого розряду в дуговий [13, 34, 36, 34355 – 359].

Схема двокамерної установки ПА для почергової роботи двох камер з одною системою управління і її загальний вигляд представлений на рис. 3.12 і рис. 3.11. Установка для ПА відповідає основним вимогам до установок для азотування (табл. 3.1, додаток 3). Основні технічні дані установки представлені в табл. 3.2, її електрична принципова схеми на рис. 3.1 і рис. 3.2 додатку 3.

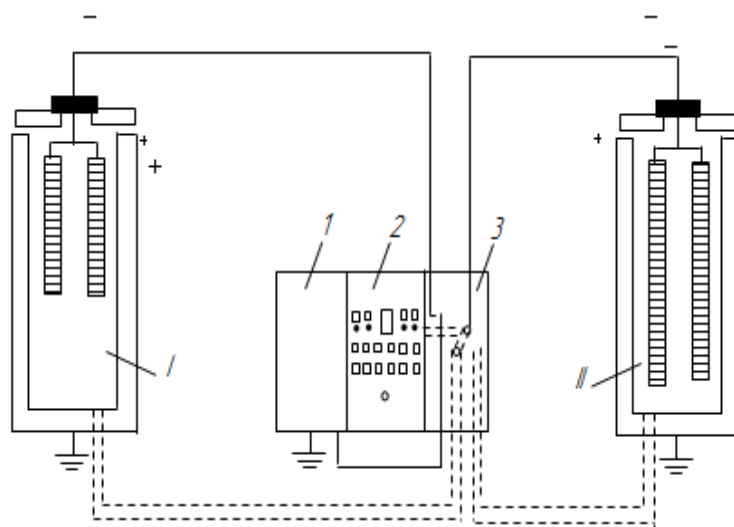


Рисунок 3.11 – Схема установки ПА для почергової роботи двох камер з одною системою управління I, II – вакуумні камери; 1 – блок живлення; 2 – система автоматичного керування; 3 – система переключення печі



Рисунок 3.12 – Загальний вигляд двокамерної установки для ПА

Схема реалізації імпульсного режиму в процесі азотування приведена на рис. 3.13 [34, 36, 354 – 359]. Імпульсний режим азотування реалізується в такій послідовності. Змінний струм через понижуючий трансформатор 6 надходить на вхід електронного блоку управління 7 (рис. 3.13). Далі струм надходить на два комутуючих тиристора 1. Блок управління за допомогою змінного опору 8 дозволяє змінювати тривалість імпульсів подачі напруги на тиристори. Комутуючі тиристори регулюють амплітуду струму і тривалість його проходження по первинній обмотці трансформатора 2. З вторинної обмотки трансформатора 2 напруга подається на випрямний діодний міст 3, на виході з якого виходить однополярна пульсуюча напруга, що подається на катод-деталь 4 і анод стінки вакуумної камери 5.

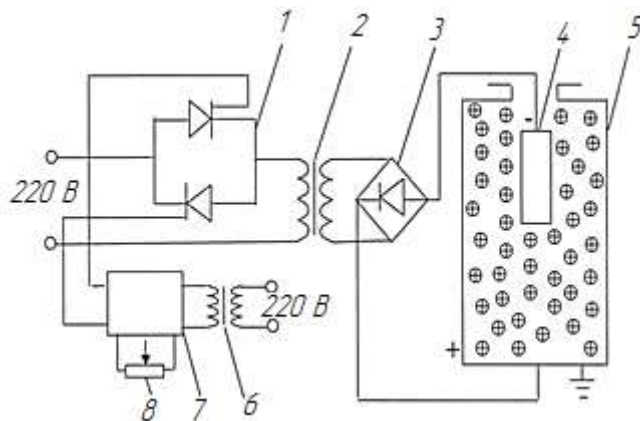


Рисунок 3.13 – Схема установки для реалізації імпульсного режиму в процесі ІА: 1 – комутуючі тиристори; 2 – трансформатор для підвищення; 3 – діодний міст; 4 – катод – деталь; 5 – анод стінки вакуумної камери; 6 – понижуючий трансформатор; 7 – блок управління; 8 – реостат

Температуру в процесі азотування вимірювали і контролювали за допомогою хромель – копелевого перетворювача манометричного термопарного типу ПМТ – 2. Його показники реєструвалися цифровим мілівольтметром Шз1315 [493, 501]. Для проведення процесу іонного азотування в імпульсному режимі і створення необхідного вмісту азоту в атмосфері застосовувалися стандартні газові балони для азоту. Поверхневе зміцнення зразків з покриттям, напиленням електродуговим методом з попередньою електроіскровою обробкою здійснювалося за такими режимами:

тиск газу, Па.....	50 – 250
температура процесу, °С.....	400, 500, 600
склад газу.....	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;
час обробки, год.....	1,5 – 4,00

Для проведення досліджень застосовувалися стандартні газові балони для аргону і пропан-бутану. Гази повинні бути висушеними і мати високу ступінь очищення.

3.3 Вибір матеріалів покриттів для досліджень

Після вибору для відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів, необхідно вибрати недорогий, доступний, зносостійкий і корозійностійкий матеріал для покриттів.

Матеріал покриття є однією з важливих складових у технологічному процесі відновлення деталей ЗТ [360 – 363]. Основною метою матеріалу покриття є підвищення фізико – механічних властивостей відновлюваних робочих поверхонь деталей ЗТ, які визначають їх експлуатаційні характеристики [360 – 368]. Вибір матеріалу покриттів визначається умовами експлуатації деталей і їх конструктивними особливостями [14, 360 – 363].

Так як основною причиною виходу з ладу деталей ЗТ (п. 1.1) є їх знос (80 %), тому у вимогах до вибору матеріалу для зносостійких покриттів повинен обумовлюватися вид зносу, і він повинен базуватися на багатогодинних випробуваннях деталей на зношування [14, 360 – 363]. Умови впливу середовища і руйнування робочої поверхні деталей зумовлюють необхідний склад, будову, фазовий стан і властивості матеріалу покриття [360 – 362]. Властивості матеріалів впливають на зносостійкість і корозійну стійкість в конкретних умовах експлуатації деталей вузлів та агрегатів ЗТ і можуть змінити підхід до вибору матеріалів для цих умов роботи [360 – 368].

Матеріалом для покриттів може служити дріт діаметрів 0,8 – 2,8 мм [368 – 376]. Нанесення покриттів з дротяних матеріалів економічно ефективно для відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ [5, 369 – 377]. Перевага дроту обумовлено можливістю безперервної і рівномірної її подачі в високотемпературну зону апарату для ЕДН, що підвищує стійкість процесу і якість одержуваного покриття. Як матеріал покриттів служить дріт з будь – яких металів (цинк, алюміній, мідь, нікель, латунь, бронза, бабіт, вуглецева і нержавіюча сталь, ніхром, молібден тощо.), що випускаються промисловістю, а також порошковий дріт (додаток И) [369 – 377].

Порошкові дроти представляють собою нескінченний електрод, що виготовляється з металевої оболонки, сформованої у вигляді трубчастої оболонки, яка заповнюється порошкоподібною шихтою. Особливість плавлення порошкового дроту полягає в тому, що її оболонка плавиться за рахунок виділення в активних плямах дуги джоулевого тепла випромінювання дуги, в той же час шихта нагрівається менш інтенсивно [342 – 345]. У деяких випадках ядра тугоплавких частинок шихти можуть залишатися нерозплавленими аж до осадження на підкладку. Порошкові дроти забезпечують високі механічні та міцності властивості покриттів за рахунок введення в її склад композиційної порошкової шихти з зміцнюючих і флюсуючих елементів [14, 373 – 376]. Практика застосування порошкових

композиційних дротів показує, що експлуатаційні властивості покриттів з них вище, ніж з гомогенних. Їх перевага обумовлюються не тільки гетерогенною структурою покриття, але і активною взаємодією компонентів порошкової шихти один з одним і з поверхнею деталі, що сприяє підвищенню температури частинок, розкисненню оксидів, і як наслідок, підвищення адгезії покриття до підкладки. Для нанесення покриттів використовуються порошкові дроти, до складу яких входить шихта, що складається з порошоків феросплавів, чистих металів, карбідів, боридів, оксидів гранулометричного складу 100–200 мкм [373 – 376]. Для порошкових дротів застосовується наступний склад шихти: 80% Al + 20% Fe, 40% Al + 60% Cr, Cr₃C₂ + Al + Mo та інші. Найчастіше використовується шихта: Ti + B₄C + SiC + Al, Cr₃ + B₄C + SiC + Al, ФХБ + Al, Cr + Si + Al. Найбільше застосування знаходять порошкові дроти, оболонка яких – сталь Св – 08, Св – 08Г2С, 30ХГСА, 20Х13, 40Х13 та 65Г, а наповнювач – феросплави, карбіди, карбобориди, оксиди, бориди, силіциди та нітриди [373 – 376]. У Приазовському державному технічному університеті (м. Маріуполь) під керівництвом д.т.н. В.А. Роянова розроблені склади порошкових дротів ПП – ММ2, ПП – ММ63, ПП – ММ65, ПП – ТП – 1 [376]. Для отримання зносостійких покриттів, що працюють в умовах знакозмінних навантажень доцільно використовувати порошкову дрот ПП – ТП – 1 (додаток II). Зносостійкість покриття з порошкового дроту ПП-ММ65 підвищилася в 3 рази, а ПП – ММ63 – в 5 разів у порівнянні з покриттям з суцільнотягнутої дроту Св – 06Х19Н9Т і Св – 07Х25Н13. Значення середніх швидкостей зносу при терті покриттів з дроту ПП – ММ65 становить 0,026 – 0,028 мм/год, а зразків зі сталі Ст.3 – 1,65 мм/год при тих же умовах випробування [376]. ФМІ НАН України (м. Львів) під керівництвом проф. В.І. Похмурский розроблені порошкові дроти марок ПД (ФМІ – 1, ФМІ – 2, ФМІ – 3) [374, 375]. Дрот складається з оболонки – стрічки зі сталі 08сп товщиною 0,4 мм і порошкової шихти на основі (ФХБ + Al) і (ФХ + Al) з додаванням 5 – 20% графіту. Склад дроту забезпечує протікання

алюмотермічного (екзотермічних) реакцій, за рахунок яких створюється додаткове джерело тепла, який необхідний для нанесення покриттів з порошкових дротів, що містять тугоплавкі компоненти. Діаметр дроту впливає на міцність зчеплення. Зі зменшенням діаметра дроту міцність зчеплення збільшується [374]. Склади дротів наведені в додатку И. Покриття, отримані з порошкових дротів, мають велику твердість і зносостійкість, проте їх істотний недолік – висока ціна [374 – 376]. Розроблено альтернативний варіант порошкової дроті – комбінація з двох суцільнотягнутих (вуглецевої і хромонікелевої) дротів [374, 375]. Випробування на адгезійно – когезійну міцність і зносостійкість покриттів показали порівнянність результатів.

Для відновлення деталей ЗТ доцільно замінювати дорогі порошкові дроти з високолегованих сплавів на більш дешеві й доступні сталеві дроти суцільного перетину з залізо – вуглецевих сплавів. Вартість суцільнотягнутих дротів в порівнянні з порошковими дротами в 2,5 – 4 рази нижче, стабільність горіння дуги вище. Леговані та високолеговані дротові матеріали дозволяють отримувати найкращі властивості покриттів. Підвищення властивостей обумовлено дією легуючих елементів в сталі [366 –368]. Структура покриттів з хромистих сталей складається в основному з мартенситу і продуктів його відпустки. При значному вмісті хрому у вихідному дроті в покритті утворюються карбіди $Cr_{23}C_6$, а також невелика кількість аустеніту. Хром в значній мірі підвищує корозійну стійкість покриття, а також адгезію покриття до мастил [366 –368]. Нікель знаходить широке застосування в сплавах для захисних покриттів [366 –368]. Власних твердих фаз в сплавах заліза нікель не утворює. Його вплив полягає в істотному підвищенні стійкості покриттів до ударних навантажень. Зі збільшенням вмісту нікелю підвищується в'язкість сплаву практично без шкоди для зносостійкості. Молібден часто використовують для нанесення підшару [369, 370]. Це пов'язано з гарною адгезією молібдену до чорних металів. Мікроструктурний аналіз дозволив встановити, що покриття,

отримані із застосуванням дротів, що містять високий відсоток (від 0,8 до 2,3) кремнію і марганцю, мають найбільш пористу структуру за рахунок шлаків нерозчинних в залозі, і відповідно найменші властивості міцності в порівнянні з покриттями з матеріалу дротів з меншим вмістом розкислювачів. З цього випливає висновок: для покриттів необхідно застосовувати дроти з якомога меншим вмістом марганцю і кремнію [369, 370].

У додатку Д представлені марки дротів виробництва іноземних компаній. З економічної точки зору для покриттів доцільно застосування дротів виробництва країн СНД (додаток И). Дроти Нп – 651, Св – 07X18П9ТЮ, Нп – Х20Н80Т, Св – 08Г2С і Нп – 40Х13 є найбільш доступними для споживачів [361 – 363, 369, 370]. Для покриттів використовують дріт з електропровідних матеріалів і терморегулюючий порошковий дріт діаметром 0,8; 1,0; 1,6 і 2,0 мм [405, 406].

Зносостійкість покриттів забезпечується при використанні дроту з вуглецевої, низько – і високолегованої сталі [369, 370, 392, 393,], корозійна стійкість – за рахунок дроту з мартенситних і аустенітних сталей [369, 370]. Мартенситну структуру отримують при швидкому охолодженні покриття системи Fe – Сг, що знаходиться в області аустенітного або аустенітно – мартенситного стану. При цьому високовуглецеві сталі набувають значну корозійну стійкість [366 – 368]. Аустенітну структуру при номінальній температурі мають покриття Fe – Сг – Ni і Fe – Сг – Ni – Mn. Такі сталі характеризуються підвищеною корозійною стійкістю і жаростійкістю [369 – 371]. Вибір відповідної марки сталі [360] багато в чому визначається параметрами робочого середовища і повинен бути заснований на попередніх випробуваннях зразків. Для підвищення зносостійкості використовуються дроти з мартенситно – аустенітної матрицею, зміцненої карбідною фазою [362 – 365]. Властивості мартенситно – аустенітної матриці залежать від вмісту в ній вуглецю. Низьковуглецевий мартенсит матиме знижену зносостійкість, але завдяки високій, в порівнянні з високовуглецевим мартенситом, в'язкості

буде краще утримувати включення твердих зносостійких частинок і забезпечувати підвищення опору ударним навантаженням. При підвищенні вмісту вуглецю в мартенситі зносостійкість буде підвищуватися [366, 367, 368]. У нелегованих сталях з вмістом вуглецю приблизно до 1,2% після гарту і низького відпуску вільних карбідів в структурі практично немає, і зміна вмісту вуглецю в сталі змінює вміст вуглецю в мартенситі, що дозволяє судити про зносостійкість мартенситної матриці [366, 367]. Доцільно вибирати матеріал покриттів, особливістю якого бути здатність в процесі нанесення і обробки покриттів до фазових перетворень і структурних змін [360]. Наукова гіпотеза, покладена авторами [360] в основу вибору матеріалів для покриттів полягає в наступному. Високу твердість і зносостійкість покриттів можна досягти, використовуючи сталі, в яких сформована двофазна структура, яка містить метастабільний аустеніт, що має твердість 200 – 300 HV, а також певну кількість оксидів. В процесі нанесення покриттів і їх обробки внаслідок інтенсивної пластичної деформації метастабільний аустеніт буде трансформуватися в зносостійкий і твердий мартенсит ($HV = 700 - 800$) за рахунок протікання деформаційного $\gamma - \alpha$ перетворення.

У зв'язку зі сказаним доцільним є використання для покриття сталей мартенситного і аустенітного класів, особливістю яких є здатність до фазових перетворень і структурних змін при нанесенні і обробці покриттів. Це дозволить поліпшення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей деталей ЗТ, підвищити їх зносостійкість і корозійну стійкість.

На підставі аналізу літературних джерел [360 – 377, 378, 379] для досліджень були обрані сталі аустенітного (X18H10T, 12X18H10T), мартенситного (40X13, 95X18, 30XГСА) і феритного (СВ 08, Св – 08Г2С) класів (табл. 3.3) [365 – 370, 380, 381].

Вибір цих сталей обумовлений структурно - фазовими перетвореннями в них в процесі нанесення і обробки покриттів [382 – 386]. Максимальна зносостійкість покриттів з цих сталей досягається за рахунок

міститься в їх структурі метастабільного аустеніту, який здатний до деформаційних перетворень [387].

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сталей, обраних для досліджень

Марка Стали	Концентрація елементів, мас. %						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,42	13,4	0,54	0,13	0,44	0,27	Основа
95X18	1,0	18,0	0,6	0,2	≤0,8	0,8	Основа
Св – 08	0,06	0,1	–	–	0,40	0,25	Основа
Св – 08Г2С	0,08	0,3	0,3	-	1,5	1,0	Основа
30ХГСА	0,3	1,0	0,3	-	1,0	1,1	Основа
12Х18Н10Т	0,12	18,0	10,0	0,8	2,0	0,8	Основа

При термодіформаційному впливі пластично деформований аустеніт знаходиться в метастабільних станів і характеризується спотворенням кристалічної решітки, структурними перетвореннями, збільшенням опору деформації і т.п. [385, 387]. При деформації аустеніту під дією прикладених ззовні напружень виникає мартенсит, який має підвищену міцність. Інтенсивність зміцнення пропорційна кількості мартенситу деформації, залежному від ступеня пластичної деформації і температури, при якій відбувається деформування. У мартенсите деформації утворюються сегрегації вуглецю такого ж типу, як і при старінні, що призводить до додаткового зміцнення. Температура початку мартенситного перетворення у сталей близько 400 °С. Закінчується перетворення при температурі значно нижче кімнатної. Процес перетворення аустеніту в мартенсит деформації γ Fe (A) \rightarrow α – Fe (M) і супутні цьому явища, поглинають велику кількість енергії [385, 387]. Зростання здатності металу до поглинання енергії призводить до підвищення опірності зношування.

Таким чином, структура покриттів і особливості розглянутих вище хромистих сталей складається в основному з мартенситу і продуктів його відпустки. При цьому в процесі ЕДН хром практично не вигорає [365 – 370, 388 – 391] і в покритті утворює карбіди, що сприяє підвищенню зносу – і корозійної стійкості.

Зносостійкість покриттів можна забезпечити при використанні сталей мартенситного (40X13, 95X18) класу, а корозійну стійкість – аустенітних сталей (X18H10T, 12X18H10T) [365 – 370, 380, 381, 392 – 395].

Для нанесення підшару використовували метод ЕІЛ [164, 165], основна мета якого – підвищення адгезійної і когезійної міцності напилених покриттів, зниження рівня напруги, що виникає в умовах експлуатаційних навантажень.

Особливість вибору матеріалу електрода для ЕІЛ залежить від фізико-хімічних властивостей катода [396, 397]. В даний час рекомендують використовувати дві групи електродних матеріалів [396, 397]: 1) на основі металу з добавками, які використовуються в якості фази зміцнення; 2) на основі тугоплавкого з'єднання з металевою добавкою, яка вводиться в якості пластифікуючої зв'язки.

Для обох груп матеріалів головною вимогою формування покриття є утворення необмежених твердих розчинів (інтерметалідів) матеріалами електродів [9, 164, 165, 396, 397]. На основі даних про взаємну розчинності металів і тугоплавких сполук в металах з урахуванням принципу вибору компонентів зносостійкого складової матеріалу складені варіанти поєднання елементів матеріалу електрода-інструменту, що забезпечують ефективне формування легованого шару на сталях (табл. 3.4). Традиційно в якості матеріалу легуючого електрода використовують тверді сплави марок ТК і ВК. Ці сплави не завжди сприяють умовам, які висуваються до електродним матеріалами для ЕІЛ [396, 397]. Але головна причина нераціональності їх використання – зростаюча дефіцитність вольфраму, який ставить питання про заміну твердих сплавів безвольфрамовими.

Перед напиленням сталей наносили проміжний шар з ніхрому (сплав X20H80) товщиною до 0,2 мм методом ЕІЛ. Товщина покриття становила 0,25 – 3,0 мм. Ніхром використовують для нанесення підшару [9, 369, 370]. Це пов'язано з його гарною адгезією до чорних металів.

Таблиця 3.4 – Варіанти поєднання елементів матеріалу електрода - інструменту

Матеріал катоду	Матеріал електрода	
	Основа	Зв'язка
Вуглецеві сталі	Cr, Mo, W, TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, Mo ₂ C, WC, Mo ₂ B ₅ , W ₂ B ₅	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, C, MgO, NbC, TaC, TiC, CaO
Швидкоріжучі сталі	TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, WC, W ₂ B ₅	V, Cr, Co, Ni, W, Mo
Титан і його сплави	Cr, Mo, W, Ni, Al, TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, WC, W ₂ B ₅ , NiAl, TiAl, Ni ₃ Al	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, Al, Zr, Nb
Сплави алюмінію	Cr, Cu, Al, Fe	Fe, Cu, Si, Zn, Ti

Для дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень в покриттях, отриманих комбінованим методом використовували фізичні методи досліджень: оптичну металографію [398 – 400], рентгеноструктурний аналіз [401 – 403], растрову електронну мікроскопію [404]. Оцінка шорсткості поверхні після ЕІЛ здійснювалася методом РЕМ – кількісної стереофрактографії [405 – 422].

3.4 Дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень в покриттях, отриманих комбінованим методом

Залежно від технологічних режимів процесу нанесення покриттів комбінованим методом контролювали такі їх параметри: зовнішній вигляд, мікроструктуру, товщину дифузійного шару, фазовий і хімічний склад, пористість, мікротвердість.

Дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень починали з приготування шліфів. Приготування шліфів вироблялося за стандартною методикою [398, 399]. Для підготовки шліфів до металографічних досліджень здійснювалася розрізання зразків на відрізних верстатах «Discotom», «Accutom» фірми «Struers» (Данія) з застосуванням

вулканітових і алмазних дисків. Використовували мокре абразивне різання, так як застосування охолоджуючої рідини знижувало температуру в місці різу і тим самим зменшувало наклеп матеріалу. Шліфування та полірування здійснювали на верстатах типу «Neris» і «Ecomet-II» фірми «Buehler-Met» (Швейцарія). Для зручності приготування шліфів зразки запресовуються в бакелітову пластмасу. Запресування проводили на спеціальному пресі «Prontopress». Абразивна підготовка шліфів полягала в зрізанні нерівності поверхні абразивними частинками. Обробку проводили в кілька стадій, постійно зменшуючи крупність цих частинок. Як абразивні матеріали використовували порошки карбиду кремнію і алмазу. При підготовці шліфа абразивним методом шліфування проводили в 4 – 5 переходів на шкурках № M63, M50, M28, M20, M10. Шліфування вели до повного знищення рисок. Залишки абразиву з шліфа видаляли з застосування ультразвукового очищення в спирті. Операцію шліфування повторювали, використовуючи послідовно папір з меншим номером зернистості, кожен раз змінюючи напрямок руху шліфа на 90° . Після шліфування шліф промивали водою і просушували фільтрувальним папером. Щоб остаточно вирівняти поверхню, шліф полірували до дзеркального блиску. Для полірування застосовували алмазні пасти і оксид алюмінію. Алмазне полірування виконували в 3 – 4 етапи на пастах в наступній послідовності: АСМ 14/10, 10/7, 7/5, 2/1. Остаточну операцію полірування проводили на оксиді алюмінію зернистістю 1 мкм. Поверхню відполірованого зразка промивали знежиреним зневодненим етиловим спиртом (C_2H_5OH) і просушували.

Дослідження мікроструктури покриттів після напилення і азотування проводилося на нетравлених 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». Вивчення мікроструктури починали з розгляду мікрошліфа в «нетравленому вигляді», безпосередньо після полірування, промивання і просушування [398, 399]. При розгляді нетравлений шліфа визначали мікропористість отриманих

покривтів. Нетравлений зразки розглядали при збільшенні 100 – 200. Після огляду нетравленого шліфа для більш повного вивчення структури шліф трюїли. Для виявлення загальної мікроструктури застосовували 4% розчин азотної кислоти (HNO_3) в етиловому спирті [398, 399]. Товщину покриття визначали за допомогою мікрометра [400]. Структура шару ЕІЛ покриття із ніхрому відновлюваної поверхні і зон, що контактують з ним була проаналізована на поперечних шліфах.

Оптична металографія в багатьох випадках не дозволяє визначити складові сталей, зокрема, виявити присутність аустеніту, розташованого, як правило, по межах мартенситних пакетів. Основними способами визначення кількості залишкового аустеніту, мартенситу та інших складових сталей є рентгеноструктурний аналіз [401 – 403] і електронна мікроскопія [404]. Так, вміст залишкового аустеніту визначалося за формулою:

$$q_g = \frac{100}{1 + 0,74 \frac{S_a}{S_g}} \quad (3.2)$$

де S_a і S_γ – площі поверхні під дифракційними лініями (110) α – Fe і (111) γ – Fe, обмеженими лініями фону

Визначення хімічного складу покриттів, недосконалостей і включень проводилося з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) [402]. Фізична сутність РСМА полягає в генерації рентгенівського випромінювання при попаданні первинного електронного пучка на поверхню досліджуваного зразка. За допомогою ліній рентгенівського випромінювання ідентифікували хімічний склад зразка [402]. Аналіз рентгенівських променів проводиться за допомогою спектрометра. Обробка отриманих результатів включала кількісний мікроаналіз, який проводився в однакових експериментальних умовах (прискорене напруга – 20 кВ, струм пучка – від 1 до 10 А, кут нахилу площини зразка до детектора – 100) і полягав у визначенні величини відносини інтенсивності рентгенівського

випромінювання досліджуваного елемента в зразку і в ідеалі. Для отримання результатів кількісного мікроаналізу в розрахунок вводили три поправки: на атомний номер елемента (різницю в розсіянні і гальмуванні електронів в зразку і в ідеалі); на поглинання генеруючого рентгенівського випромінювання зразком; на ефект флуоресценції через безперервне рентгенівське випромінювання.

Визначення розподілу елементів здійснювали методом скануючої електронної мікроскопії (SEM) на електронному мікроскопі «Cam Scan» («Oxford Instruments», Англія, роздільна здатність становила 70 \AA) з рентгенівським енергодисперсним аналізатором. Застосовували два типи досліджень: спектр з поверхні шліфа; структуру поверхні в поєднанні з Y – модуляцією, тобто повільне сканування електронного пучка вздовж лінії з реєстрацією рентгенівського випромінювання по кожному елементу з побудовою концентраційних кривих розподілу. Для дослідження розподілу елементів в покритті застосовували зйомку в характеристичний рентгенівському випромінюванні за програмою «Smart map», яка мала два режими. У першому випадку на екрані кольорового дисплея отримували картину розподілу одного з елементів. Колір на фотографії визначає концентрацію: чорний – повна відсутність елемента, білий – 100 – відсоткове присутність, перехідні кольори говорять про проміжної концентрації. У другому випадку отримували розподіл трьох і більше елементів одночасно, при цьому кожному з елементів присвоюється умовний колір. Застосування цієї програми досліджень дає дуже хороші результати для поняття механізму дифузії. Порівняння і перевірку отриманих результатів, визначення елементного хімічного складу покриття і вивчення розподілу елементів в ньому здійснювали за допомогою скануючого електронного мікроскопа «Нанолаб – 7» фірми «Оптон» (ФРН) і мікрорентгеноспектрального аналізатора AN 10000 фірми «Лінк Аналітікл» (Англія) за програмою кількісного аналізу ZAF4 – FLS в результаті вимірів в 10 точках. Для визначення хімічної неоднорідності використовували методику

рентгеноспектрального мікроаналізу та електронний мікросонд MS – 46 «Самеса» [401 – 403].

Для дослідження фазових і структурних перетворень в напилених шарах використовувався рентгеноструктурний аналіз [13, 401 – 403]. Рентгенівська зйомка здійснювалася на дифрактометрі ДРОН – 3.0 в монохроматизованому $\text{CoK}\alpha$ випромінюванні ($V = 30$ кВ, $I = 10$ мА). Для фазового аналізу використовувалася стандартна картотека PDF. Окислені і деформовані поверхневі шари зразків електрохімічних страплювати в електроліті на основі ортофосфорної кислоти і хромового ангідриду. Запис дифракційних ліній здійснювалася в режимі сканування. Крок сканування – $0,1^\circ$, час набору імпульсів в точці 10 с.

Метод растрової електронної мікроскопії. Фрактографічні дослідження в роботі проводилися з використанням методу растрової електронної мікроскопії на мікроаналізаторах «Самскап-4DV», основне призначення якого полягає у відтворенні за допомогою електронно – променевої трубки тривимірного зображення поверхні зразка за загальноприйнятою методикою [401 – 403]. При цьому можливо дослідження мікротопографії грубих поверхонь і масивних зразків, що не представляється можливим при використанні традиційних методів трансмісійної електронної мікроскопії. При взаємодії електронного пучка з зразком виникають низькоенергетичні вторинні електрони малої енергії (генеруються в зразку пучком), а також високоенергетичні первинні електрони, які позначилися від поверхні зразка. Сигнал від електронів дозволяє фіксувати зображення ділянок поверхонь. Використання програми «Linescan» дозволяє реєструвати і обробляти рентгенівське випромінювання досліджуваного зразка, фіксувати характерні діапазони енергій, управляти розгорткою растрового електронного мікроскопа і збирати інформацію про відносне зміст елементів вздовж певної лінії з подальшою обробкою і роздруківкою результатів дослідження.

Фотографічні зображення топографії поверхонь з покриттями отримували з використанням скануючого растрового електронного

мікроскопа «Нанолаб – 7» фірми «Оптон» (ФРН) [401 – 403]. Морфологія (топографія) поверхонь з напиленням покриттями і з покриттями після напилення і азотування досліджувалася в режимі відбитих електронів при напрузі 10 – 20 кВ. Роздільна здатність скануючого растрового електронного мікроскопа становила 70 Å. Для дослідження геометричних параметрів застосовували профілограф – профілометр моделі 201 і «Talysarf – 5» фірми «Taylor – Hobson». Шорсткість оцінювали величиною мікронерівностей R_a , яку визначали за допомогою профілограм, знятих на профілографі - профілометрі.

3.5 Методика кількісної стереофрактографічної оцінки морфологічних особливостей відновлюваних поверхонь після ЕІЛ

Для оцінки впливу ЕІЛ на міцність зчеплення напилених покриттів необхідно досліджувати морфологічні особливості відновлюваних поверхонь після ЕІЛ і визначити їх шорсткість. Подання про макроструктуру досліджуваних поверхонь дозволяє дати аналіз поперечних шліфів зразків (темплетів) шляхом оптичної металографії [398]. Завдання, близьку до цієї, вирішує метод мікрорентгеноспектрального і рентгеноструктурного аналізу [401 – 403]. Для оцінки величини мікронерівностей після ЕІЛ було запропоновано використовувати метод кількісної стереофрактографії [406 – 412]. Стереофрактографія (стереоскопічна фрактографія) – метод вивчення морфологічних особливостей відновлюваної поверхні по її будові в просторовому відображенні [406 – 417]. Для отримання стереоскопічних пар використовувався растровий електронний мікроскоп (РЕМ) [404]. Метод, обраний для досліджень, дозволяє кількісно оцінити морфологічні особливості формування як самої поверхні після ЕІЛ, так і її фазовий склад, пов'язаний з морфологічними особливостями [406 – 422].

Методика кількісної стереофрактографічної оцінки морфологічних особливостей поверхонь призначена для дослідження об'єктів, що підлягають

спостереженню і фотографуванню в РЕМ з залученням апарату фотограмметрії і використовувалася для кількісної оцінки геометричних параметрів рельєфу поверхні після ЕІЛ [406 – 417].

Для фрактографічного аналізу рекомендується наступна послідовність операцій [418 – 422]: візуальний огляд відновлюваної поверхні після ЕІЛ; спостереження за допомогою мікроскопа зі збільшенням (до 10 – 15 разів); спостереження за допомогою мікроскопа з поступовим наростанням кратності збільшення, щоб отримати уявлення про мікрорельєф відновлюваної поверхні. Для аналізу стереомоделі досліджували мікроділянки з високою кратністю збільшення; проведення стереозйомки вибраної ділянки поверхні.

Проведення стереозйомки. Кількісний аналіз стереопар, отриманих на растровому електронному мікроскопі з поверхні сталей, що містять вогнища ЕІЛ, показав не тільки можливість оцінки топографії відновленої поверхні в тривимірному вимірюванні, а й визначення з високою точністю геометричних параметрів покриття [408].

Загальні вимоги до зйомки стереопар полягають в наступному [408]: при зйомці стереопар за допомогою растрового електронного мікроскопа зображення орієнтують, таким чином, щоб одна зі сторін кадру була паралельна осі нахилу; під час зйомки стереопари (при зміні кута нахилу) не допускається перефокусування зміни струму лінз; зміна фокусу проводиться тільки переміщенням зразка уздовж оптичної осі мікроскопа; необхідно, щоб всі сторони рамки кадрування приладу мали чітко позначені виступи або западини для полегшення подальшого орієнтування кожного зі знімків стереопари з мінімальним взаємним перекосом.

Зйомка способом нахилу зразка після ЕІЛ полягає в наступному: після вибору об'єкта і ракурсу зйомки необхідно виконати перший (базовий) знімок в початковому положенні без нахилу при вугіллі $Q = 0$; необхідно нахилити об'єкт по відношенню до вихідного положення щодо осі X на кут конвергенції Q.

Величина і знак кута Q залежать від конкретних умов зйомки. На практиці кут $Q = 5^\circ$, але можливі його значення дещо відмінні від зазначеного. Не змінюючи величину сигналу необхідно сфокусувати і виставити в попереднє положення зображення шляхом горизонтального зсуву зразка в мікроскопі. Після цього здійснюють другий знімок стереопари. Для отримання прямого стереоефекту під час зйомки методом нахилу, кадр, знятий під меншим кутом нахилу відносно горизонтальної площини, встановлюють для перегляду лівим оком, а під великим кутом – для перегляду правим оком. При цьому вісь нахилу зразка (темплету) повинна проходити перпендикулярно лінії, що з'єднує зіниці спостерігача. Кількісний аналіз з побудовою рельєфу поверхні виконували за допомогою «Стекометра Е». При зйомці стереопар способом нахилу, перевищення на стереомодель поверхні покриття визначають за формулами [377]:

$$\Delta h = \frac{\Delta P_x}{\frac{2M \sin \theta}{2}}, \text{ при нахилі } \pm \frac{\theta}{2} \quad (3.2)$$

$$\Delta h = \frac{x_0 \cos(\theta - x_1)}{M \sin \theta} \quad (3.3)$$

Вимірювання проводили на стереопарах, які встановлювали на предметному склі вимірювального приладу з мінімальним перекосом їх координатних осей, пов'язаних з мікроскопом [408]. Калібрування збільшення виробляли зйомкою об'єкта при тому ж робочому відстані, при якому здійснювали зйомку зразка, що містить ЕІЛ – покриття [408]. Сумарна похибка вимірювань включає похибки [408]: визначення кратності збільшення зображення на стереопару і кута нахилу Q° ; визначення положення проекції осі нахилу на кожному зображенні, що становить стереопару; фото збільшення позитиву стереопари; усадки підкладки фотоемульсії; непаралельності координатних осей негативів, визначення складових стереопар і розташованих на предметному склі вимірювального

приладу; спотворення зображення в РЕМ.

Для забезпечення точності наближення ортогонального проектування зйомку стереопар методом нахилу проводили при використанні РЕМ з дотриманням співвідношення $M/H = 5 \times 10^3$ мм (H – робоча відстань, мм; M – кратність збільшення зображення) [408]. Розрахунок параметрів стереомоделі з урахуванням фактичної побудови зображення здійснювали за рекомендаціями робіт [406 – 422]. Характеристикою, яка контролює зміну макроскопічних характеристик поверхні після ЕІЛ є мікротвердість.

3.6 Визначення мікротвердості і твердості відновлених поверхонь

Вимірювання мікротвердості від краю відновлюваної поверхні з покриттям до основи з захопленням перехідної зони проводилося з використанням Мікротвердоміри «Micromet-II» при навантаженні 100 г протягом 15 с. Визначення мікротвердості окремих фаз і структурних складових покриття виконували на шліфах за Вікерсом [423 – 429]:

$$HV = 1854,4 \times \frac{P}{l} \quad (3.4)$$

де P – пробне навантаження, l – довжина діагональної лінії через відбиток (мкм) на плоскій полірованій поверхні

Твердість відновленої поверхні визначали електронним переносним програмованим твердоміром ТЕМП – 3. Діапазон вимірювання твердості за шкалами: Бринелля 95 – 460 НВ; Роквелла 22 – 68 HRC; Віккерса HV 49 – 950; Шора, 23 – 99 HSD. При обчисленні твердості користувалися таблицями, в яких наведені значення макротвердості в залежності від прикладеного навантаження і довжини діагоналі (чим більше довжина діагоналі, тим менше твердість матеріалу). Твердість поверхні може бути визначена в разі, якщо її товщина не менше ніж у вісім разів більше глибини проникнення індикатора [424, 425, 429]. Похибка показань приладу 3%.

3.7 Методи оцінки пористості покриттів

Визначення пористості є основним засобом оцінки якості відновлених поверхонь з покриттями [424 – 426, 430 – 434]. Оцінити розподіл пор за обсягом покриття, визначити форму пір і їх розміри дозволяє планіметричним методом металографічного аналізу. В основі методу лежить спосіб випадкової січної, який заснований на рівнянні, що є частиною першого основного стереометричного співвідношення, згідно з яким об'ємна частка структурної складової (фази, пор) в матеріалі дорівнює частці довжини січної лінії, що проходить через цю складову в обсязі шліфа [424, 425, 434]. Спосіб зводиться до вимірювання і підсумовування довжин відрізків прямої лінії, що проходить через дану структурну складову, на певній довжині січною прямою [434]:

$$V_n = \frac{I_n}{l} \quad (3.5)$$

де I_n – сумарна довжина відрізків випадкової січної, що проходить через пори; l – повна довжина січної

Для підтвердження результатів визначення пористості відновлених поверхонь з покриттями планіметрична способом металографічного аналізу [424, 425, 434] використовували кількісний стереологічний аналіз [424, 425] на автоматичному аналізаторі зображення «Mini – Magiscan» за програмою «Genias 26». Основними етапами аналізу зображення є: калібрування зображення, фіксація зображення, сегментування, пористість. У програмі «Genias 26» калібрування здійснюється за розміром μ – штриха на електронному зображенні. Операція фіксації полягає в перетворенні зображення в електричний сигнал, який піддається цифровій обробці. Сегментування «відокремлює» досліджувані об'єкти (пори) від фону. Обробка результатів аналізу зображення проводили за програмою «Results», яка дає можливість статистичного аналізу результатів за допомогою одного з

заданих вимірювань і побудови гістограм за допомогою одного з вимірних параметрів з бажаним кроком [424, 425]. Для отримання статистичних даних за програмою «Results» використовували формули математичної статистики, представлені нижче: математичне очікування (середнє арифметичне) $\bar{x} = \Sigma x/n$; середнє геометричне $G = (\prod x)^{1/n}$; середнє гармонійне $H = 1/(\Sigma(1/x)/n)$; дисперсія (варіація) вибірки $S^2 = (\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/n)/n$; середнє квадратичне відхилення вибірки $S = \sqrt{S^2}$; дисперсія сукупності $\sigma^2 = (\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/n)/(n - 1)$; середнє квадратичне відхилення сукупності $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$; стандартне відхилення від середнього $\sigma_x = S/\sqrt{n}$; відносна помилка σ_x/x ; асиметрія $(\Sigma x^3 - 3x\Sigma x^2 + 2x^3n)/n$; ексцес $(\Sigma x^4 - 4x\Sigma x^3 + 6x^2\Sigma x^2 - 3x^4n)/n$.

Таким чином, пористість покриттів оцінювали планіметрично способом металографічного аналізу [424, 425, 434] шляхом обчислювання пір з фотографій, отриманих на світловому мікроскопі «MeF-3» фірми «Reichert» і кількісним стереологічним аналізом за програмою «Results» [424].

3.8 Дослідження корозійної стійкості зразків з покриттями

Довговічність і надійність деталей ЗТ залежать від характеру навколишнього та робочого середовища. На ефективність використання деталей ЗТ істотно впливає ступінь їх захищеності від корозії [435 – 437].

Мета досліджень – оцінка захисних властивостей відновлених поверхонь із сталевими покриттями, отриманих комбінованим методом. Для досягнення поставленої мети були проведені потенціодінамічні дослідження, досліджувалася динаміка зміни потенціалу в часі [438 – 441]. Електрохімічний потенціал є термодинамічної функцією активності поверхні, що дозволяє проводити порівняльний аналіз [441]. Кінетика зміни потенціалу дозволяє стежити за активацією або пасивацією поверхні в ході розвитку на ній електрохімічних процесів. Однак за значенням потенціалу можна судити про кількісних електрохімічних показниках, таких як швидкість розчинення поверхні, масові втрати матеріалу поверхні. Для

оцінки напівкількісного критерію інтенсивності розчинення поверхні користувалися потенціодінамічним методом [441]. Алгоритм дослідження полягає в наступному: виділення робочої області на поверхні випробуваного зразка з фіксованою площею; приготування середовища для випробувань; зняття хронограми потенціалу зразка в даному середовищі; потенціодінамічні дослідження; обробка даних і побудова хронограму і потенціодінамічних кривих.

Як об'єкти дослідження виступали зразки із сталей 45 і 95X18 з покриттям із сталей мартенситного (40X13, 30XГСА) і аустенітного (12X18Н10Т) класів, отриманих комбінованим методом. Підготовка зразків передбачала такі операції: припайку провідника до зразка; нанесення шару суміші парафіну з каніфоллю на поверхню за винятком робочого фрагмента. Методика проведення лабораторних випробувань [438 – 441] включала приготування агресивного середовища наступного складу: 150 г води і 5 г кухонної солі і побудова хронограму. Суть методу хронограми потенціалів полягала в наступному [441]:

- збиралася електричний ланцюг, що складається з електрода і випробуваного зразка. Як електрод використовувався насичений хлорсеребром електрод;

- попередньо підготовлений зразок (зразки) разом з електродом занурювали в агресивне середовище;

- в момент занурення, і через деякі проміжки часу фіксуються значення ЕРС ланцюга. В якості індикаційного приладу використовувався потенціостат ПІ – 50.1, який працював в режимі мілівольметра;

- за отриманими результатами будувалися графіки залежності потенціалів зразків від часу (представлені в розділах 5).

Залежно від характеру зміни електродного потенціалу, в часі, можна припускати який з процесів (розчинення або пасивація) має місце. Активізація поверхневих іонно – обмінних процесів супроводжується зниженням електродного потенціалу, що призводить до збільшення термодинамічної ймовірності анодного процесу розчинення матеріалу.

Шляхом проведення аналізу результатів можна прогнозувати, який з матеріалів покриттів і способів їх нанесення забезпечить найкращу протекцію поверхні. Це основна причина, по якій був обраний метод хронограму (кінетика електродного потенціалу).

Результати вимірювання усереднених значень потенціалів зразків з покриттями, які протягом певного періоду перебували в середовищі, представлені в розділі 4. Крім усереднених даних значень потенціалів наведені значення для кожного із зразків. Отримані дані дозволяють судити про значення потенціалів (щодо середнього) в момент занурення і в перший, невеликий проміжок часу у двадцять хвилин після занурення. У перший період часу після занурення корозійні процеси найбільш інтенсивні і найменш рівнозначні, що пов'язано зі зміною співвідношення площ катодних і анодних ділянок металевого матеріалу і пористістю покриттів. У перший, проміжок часу корозійні процеси протікають переважно в найбільших порах покриття, які заповнюються агресивним середовищем. Потім певну кількість продуктів корозії накопичується в порах, і встановлюється деякий корозійне рівновагу, що здатне пояснити менше розсіювання значень потенціалів в інтервалі варіювання, в порівнянні з першим проміжком часу.

Візуальна оцінка стану відновленої поверхні оцінювалася за трьома критеріями [438 – 441]: наявності продуктів корозії на поверхні після висушування поверхні, випробуваного зразка; приблизне співвідношення площ зі слідами іржі і без них; роздутість покриттів після випробувань.

3.9 Розрахунково – експериментальна методика визначення адгезійної міцності системи «відновлювана поверхня – покриття»

Адгезійна міцність [424, 425, 442 – 446] (міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею) – напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню, що приводить до відділення покриття від відновлюваної поверхні.

Когезійна міцність (міцність покриття) – напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню, яке приводить до руйнування самого покриття [442 – 446].

Працездатність системи «відновлена поверхня – покриття» характеризують як адгезійної, так і когезійної міцністю покриття [444 – 446]. Необхідність їх визначення виникає як на етапі розробки технології відновлення шляхом нанесення покриттів, так і при контролі системи «покриття – відновлювана поверхня деталі». Різниця полягає лише в тому, що в першому випадку адгезійна і когезійна міцності є параметрами оптимізації, а в другому – параметрами контролю. Однак, в роботі [444 – 446] показано, що адгезійна і когезійна міцності – характеристики взаємопов'язані і на підставі інформації про одну з них неможливо судити про рівномірність відновленої деталі з покриттями в цілому. В літературі [444 – 460], присвяченій питанням дослідження когезійної і адгезійної міцності покриттів, основна увага приділена останньої. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при експлуатації відновлених поверхонь з покриттів, має місце відшарування покриттів від основи, і тому сформувався думка, що адгезійна міцність для покриттів є лімітуючим параметром.

Практичний досвід відновлення деталей шляхом нанесення покриттів свідчить про те, що адгезійна міцність покриттів з відновлюваною поверхнею залежить від шорсткості, мікроструктури і температури поверхні деталі. В даний час розроблено значну кількість методів і пристроїв для визначення міцності зчеплення покриттів з відновлюваною поверхнею [447 – 460]. Методи вимірювання міцності зчеплення відрізняються великою різноманітністю: ультразвуковий метод, випробування на зрушення і на відрив і ін. [447 – 460].

Випробування на відрив вважають найбільш об'єктивними. Ці методи мають ті переваги, що забезпечують рівномірний докладання зусиль, можливість виявлення впливу підготовки поверхні, характеру і виду руйнування. Методи кількісного визначення міцності поверхонь з

покриттями базуються на різних принципах, при цьому найбільшого поширення набули методи випробування на відрив і «штифтовий» метод [447, 453]. Однак штифтовим методам притаманні недоліки [447, 453]: невідповідність напруженого стану покриття при експлуатаційних випробуваннях, можливість визначення тільки величини адгезійної міцності покриття. У той же час необхідно досліджувати адгезійні і когезійні властивості покриттів.

Адгезійна міцність визначає зносостійкість. Вимірювання адгезійної міцності відновлюваної деталі з покриттям представляє значну складність і вимагає розробки спеціальних методів, основне призначення яких полягає в проведенні кількісного і якісного контролю деталей з покриттями, а також вивчення процесів, що відбуваються на відновлюваній поверхні деталі при формуванні покриттів.

З огляду на низьку інформативність експериментальних методів визначення механічних властивостей композиції «основа – покриття», в роботі вирішено зупинитися на експериментально – розрахунковій методиці. Такий підхід дозволяє визначити весь комплекс механічних характеристик системи покриття – основа за одне випробування на одному зразку. Це обумовлено тим, що інформація, отримана при випробуванні композиції і основи на двох різних зразках, не співпадатиме з інформацією, отриманою за одне випробування на одному зразку, так як при нанесенні покриття матеріал основи може змінити свої властивості [444 – 446]. Найбільш інформативною є методика складеного перерізу, розроблена в ІПМіц. імені Г.С. Писаренко НАН України [444 – 446]. Ця методика випробувань дозволяє здійснити комплексне визначення механічних характеристик за одне випробування: модуль пружності покриття E_p , МПа; адгезійну міцність при зсуві τ_a , МПа; когезійну міцність покриття σ_k , МПа; критичну деформацію основи $\varepsilon_{кр}$, %; коефіцієнти Пуассона основи і покриття; межу міцності $\sigma_{во}$, відносне подовження δ ; залишкові напруги в покритті $\sigma_{заль}$, МПа [444 – 446]. За основу

в цьому методі було прийнято дослідження впливу на адгезійну міцність НДС основи (експериментального зразка) і були встановлені функціональні залежності між цими факторами [444 – 446, 461 – 467]. Ідея методу полягає в тому, що на розтяг випробовується зразок з симетричним двостороннім покриттям, нанесеним до половини довжини зразка (рис. 3.14, а). Для випробувань на розтяг використовувався плоский зразок (рис. 3.14, б).

Плоска форма зразка прийнята з таких міркувань: плоский зразок, на відміну від круглого, більш зручний для наклейки тензодатчиків; він більш технологічний для нанесення покриттів; на плоскому зразку легше контролювати товщину покриття, що важливо, з огляду на сильну залежність механічних властивостей системи «основа – покриття» від товщини покриття. Такий зразок на відміну від інших дає можливість проводити випробування на стандартній розривній машині.

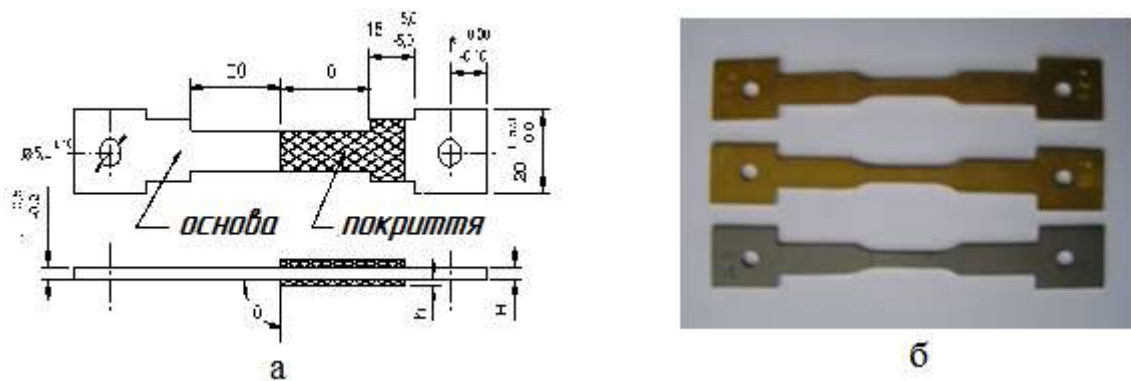


Рисунок 3.14 – Експериментальні зразки (а, б) для дослідження комплексу механічних властивостей системи «основа – покриття»

Максимум інформації про систему «основа – покриття», насамперед її пружних характеристик, деформаційних властивостей, адгезійної і когезійної міцності та ін., отриманих по методиці, що пропонується дає можливість оптимізувати цю систему і вибрати найкращу композицію.

Для оцінки комплексу механічних властивостей системи «основа – покриття» (модуля пружності покриття $E_{п}$, МПа; адгезійної τ_a , МПа і

когезійної міцності σ_k , МПа покриття, критичної деформації основи $\varepsilon_{кр}$, %; коефіцієнтів Пуассона основи і покриття; залишкових напружень в покритті ($\sigma_{зал}$, МПа) досить важливим питанням є вибір критерію, за яким вона здійснюється [344 – 346, 461 – 467].

Найбільш прийнятним є критерій критичної деформації основи $\varepsilon_{кр}$. З одного боку, він найкращим чином відображає експлуатаційні властивості композиції, оскільки його величина відображає межу спільної роботи системи «основа – покриття» і також визначає величину адгезійної і когезійної міцності. З іншого ж боку, на деформативність композиції впливають істотним чином різні технологічні чинники, які мають місце при нанесенні покриття – состав покриття, температура основи, попередня обробка поверхні зразка, введення проміжних шарів і ін. [444 – 446]. Необхідно також зауважити, що під поняттям $\varepsilon_{кр}$ мається на увазі критична деформація, яку досягає основа і покриття, тобто $\varepsilon_{кр}$ узагальнює два поняття: критичну деформацію основи $\varepsilon_{кр}^0$ і критичну деформацію покриття $\varepsilon_{кр}^n$, які не рівні за величиною, але досягаються системою «основа – покриття» одночасно [444 – 446]. Така різниця деформацій обумовлена різними площами поперечного перерізу зразка на ділянці з покриттям і на ділянці без покриття за рахунок різної товщини. Іншими словами, оцінка проводиться за принципом «слабкої ланки», якою, як правило, є покриття.

Досягнення покриттям критичної деформації обумовлено або його крихкістю або недостатньою міцністю адгезійних зв'язків. Для контролю експериментальних зразків із покриттям і визначення моменту досягнення системою деякої граничної або критичної деформації $\varepsilon_{кр}$ застосовувався метод акустичної емісії (АЕ). Метод АЕ дозволяє реєструвати процеси мікроруйнування на більш ранніх етапах, ніж візуальний або голографічний метод [462, 463].

Основні технічні дані установки СІТ - 3 наведені в табл. 3.5 [344 – 346]. Метод передбачає проведення навантаження із записом величини зусилля, а

також даних тензометрування частин зразка з покриттям і частин зразка без покриття до моменту візуальної реєстрації руйнування покриття (рис. 3.15).

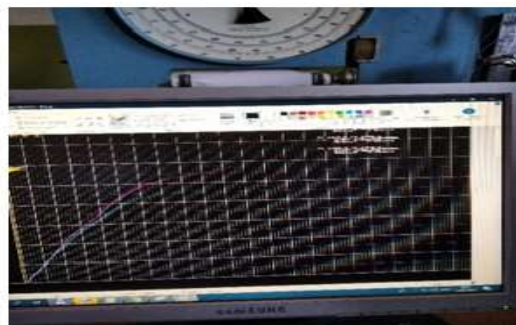
Таким чином, застосування розглянутої методики [444 – 446] дає можливість вимірювати адгезійну і когезійну міцність на зразках однієї форми, враховувати механічні властивості матеріалів покриття і відновлюваної деталі. В цьому плані методика, що використовується нами, відрізняється від інших методик визначення адгезійної і когезійної міцності «відновлювана поверхня – покриття» [444 – 446].

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики установки

Параметр	Показник
Характеристики зразка	
тип зразка	плоский
кількість зразків, що випробується одночасно, шт.	1
Характеристики силової установки	
діапазон зусиль, Н	0 – 100
регулювання швидкості деформування	плавне
швидкість переміщення захватів, см / хв	0 – 1,5
діапазон вимірювання деформацій, ЕОД... ± 9999	0,1
кількість каналів вимірювання деформацій	10
опір тензорезисторів, Ом	50 – 200
напруга живлення тензорезистрів, В	6 ± 0,5
температура повітря, С°	+10...+35
спосіб реєстрації деформацій	автоматичний
частота вимірювання блоку акустичної емісії	2
споживана потужність, кВт	1,2
напруга живлення, В	220
частота струму, f, Гц	50



а



б

Рисунок 3.15 – Зразок після випробування (а), реєстрація руйнування композиції «основа – покриття» (б)

3.10 Експериментально – розрахунковий метод визначення залишкових напружень

Визначення залишкових напружень в покриттях здійснювали на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає в тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола [468 – 472]. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруги.

Перед нанесенням покриття зразок 2 закріплювали в кондуктора 1, який представляє собою пластину з двома захватами (рис 3.16). Покриття наносили на сталеву тонку довгу прямокутну пластинку розміром 200 мм × 15 мм × 1 мм. Після нанесення покриття затискачі кондуктора знімали і визначали прогин, набутий в результаті дії залишкових напружень.



Рисунок 3.16 – Кондуктор 1 зі сталевим зразком 2 після нанесення покриття

Для розрахунку залишкових напружень необхідно знати прогин тонкої прямокутної пластини з покриттям, радіус дуги прогину пластинки зразка, значення модуля пружності основи, товщину покриття і основи. Напруження нерівномірно розподілені по перерізу покриття (рис. 3.17), однак при розрахунках допускали, що їх розподіл рівномірний, тобто, визначали середні значення залишкових напружень.

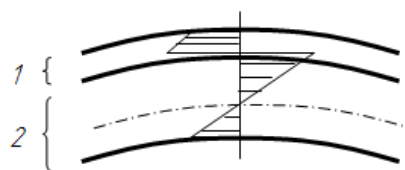


Рисунок 3.17 – Епюри залишкових напружень в покритті 1 і основі 2

Знаючи величину вимірюного прогину і використовуючи рівняння пружної лінії для балки [469 – 471], залишкові напруги визначили відповідно до наступної залежності:

$$\sigma_n^{\text{зал}} = \frac{32E_o H_o^3 f}{3a^2 h_n (1-\nu_o) \times (2H_o + h_n)} \quad (3.6)$$

де $2H_o$, h_n – товщини основи і покриття, відповідно; E_o , ν_o – модуль пружності підстави першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи, відповідно; f , a – прогин і довжина зразка, відповідно

Через прогин f і хорду l за допомогою залежності $R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}$ розраховували радіус кривизни R (рис. 3.18). Залишкові напруги $\sigma_n^{\text{зал}}$ згідно методу розрахунку тонких пластин на вигин визначали наступним чином:

$$s_n^{\text{зал}} = \frac{4E_o H_o^3}{3R h_n (1-\nu_o^2) \times (2H_o + h_n)} \quad (3.7)$$

де R – радіус кривизни, який отримує зразок в результаті деформації, викликаної залишковими напруженнями

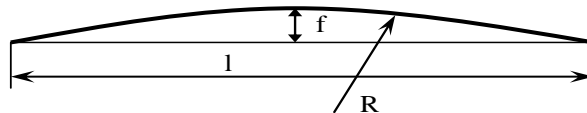


Рисунок 3.18 – Розрахункова схема обчислення радіуса кривизни R зразка: l – стріла (довжина) і f – хорда сегмента

З урахуванням пружних властивостей покриття залишкові напруги можна визначити за формулою:

$$\sigma_n^{\text{зал}} = \left[(h_n^3 E_n + 8H_o^3 E_o) \left(\frac{1}{6R h_n E_n (h_n + 2H_o)} + \frac{1}{12R H_o E_o (h_n + 2H_o)} + \frac{1}{24R^2 E_o H_o} \right) + \frac{h_n + 2H_o}{2R} \right] \times \frac{2H_o E_o E_n}{h_n E_n + 2H_o E_o} \quad (3.8)$$

Величина залишкових напружень для різних товщин покриття, розрахована таким чином, дозволить встановити граничні напруги, при яких покриття починає руйнуватися. При цьому похибка розрахунків становить менше 10%.

Для підтвердження результатів досліджень залишкових напружень в покриттях їх оцінювали методом графічного диференціювання [469 – 473], виходячи з принципу еквівалентності навантаження адгезійного зв'язку. Цей принцип дозволяє встановити функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, залишковими напруженнями і деформацією основи. Застосування методу графічного диференціювання залежно $\sigma_{зч} = f(h)$ дозволило оцінити рівень залишкових напружень в покритті, і показати, що зростання товщини покриття призводить до зниження середнього значення залишкових напружень до асимптотично мінімальних значення [469 – 473].

3.11 Метод оцінки НДС системи «відновлювана поверхня – покриття»

Для оцінки НДС системи відновлювана поверхня – покриття» використовувалися чисельні методи [474 – 481]. Метод кінцевих елементів [474 – 481] є найбільш перспективним для прогнозування працездатності деталей з покриттями. Цей метод реалізований в програмах NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, тощо. [478 – 480]. Програми забезпечують можливість моделювати складні геометричні форми деталі і конструкції з урахуванням будь – якого типу експлуатаційного навантаження. Застосування цих програм обумовлена використанням їх для вирішення складних завдань механіки деформованого твердого тіла, теорії коливань і інших розрахунків, таких як розрахунок ЕК на міцність [482 – 488].

Побудова і розрахунок моделей проводився з використанням ліцензованого кінцево – елементного комплексу MSC «Visual Nastran» for Windows 2003 вибір якого обумовлений відносною простотою і

універсальністю [474 – 477]. Він розрахований на аналіз стаціонарних і нестаціонарних задач теплопровідності, рішення задач статичної термопружності, оптимізацію конструкції і виконання інших розрахунків. Кінцево елементний комплекс MSC «Visual Nastran» для Windows 2003 існує всі необхідні інструменти для проведення повного циклу розрахунків.

При математичному моделюванні і розрахунках НДС ставилося завдання визначення максимально можливої несучої здатності відновлюваної поверхні з покриттям і її довговічності для розглянутої технології відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.

Методика розрахунку НДС композиції «відновлювана поверхня – покриття» з урахуванням експлуатаційних і технологічних факторів складається з декількох етапів: визначення напружень, що виникають від дії навантажень при нанесенні покриттів; визначення залишкових напружень; дослідження НДС методом суперпозиції [474 – 481, 482 – 488]. При розрахунку НДС композиції «основа – покриття» враховувалися її геометричні параметри; властивості матеріалів; силові і температурні навантаження, що діють на систему; вид розрахунку (статичний, тепловий тощо) [474 – 481, 482 – 488]. В роботі використовувалися реальні експериментальні зразки. Оскільки багато деталей ЗТ, зокрема ДВЗ працюють у складних статичних і динамічних умовах навантаження, то для розрахунку НДС в системі «основа – покриття» використовували програмний комплекс MSC «Visual Nastran» for Windows [475 – 480], в якому реалізована інтегральна постановка лінійної задачі (задачі термопружності).

МКЕ є потужним чисельним методом вирішення найрізноманітніших інженерних задач і має вирішальне місце в прогнозуванні працездатності конструктивних елементів під дією експлуатаційних факторів [474 – 481]. Важливим етапом кінцево – елементного аналізу є побудова розрахункової моделі і її кінцево – елементної сітки. Програмний комплекс MSC «Visual NASTRAN» для Windows дозволяє без використання допоміжних CAD –

програм будувати геометрію і кінцево – елементну сітку в своєму середовищі або імпортувати з інших програм. Рішення задач з використанням МКЕ складається з наступних етапів: побудова розрахункової моделі; створення геометричної комп'ютерної моделі; створення МКЕ на основі геометричної моделі; завдання початкових і граничних умов; чисельне рішення задачі; аналіз результатів; фіксація результатів (рис. 3.19).

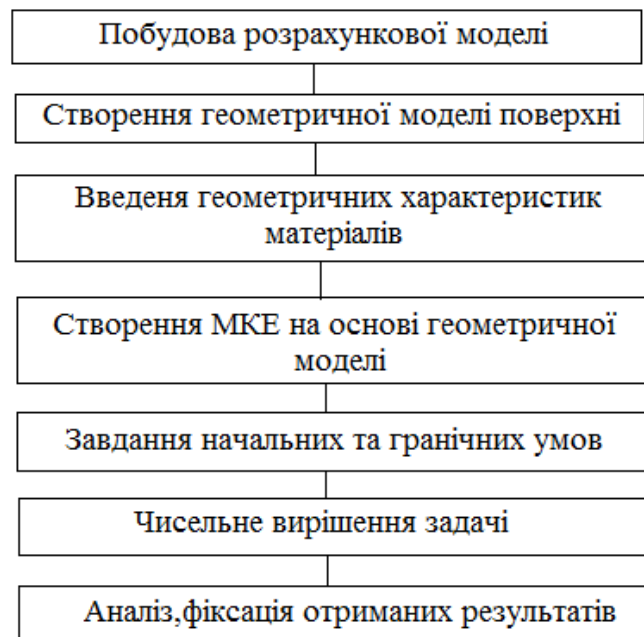


Рисунок 3.19 – Схема основних етапів розрахунку НДС системи

«відновлювана поверхня – покриття методом кінцево – елементного аналізу»

При створенні КЕС необхідно враховувати, що найбільш густа сітка необхідна там, де градієнт температур, деформацій або напружень є ймовірно великим. Менш густа сітка використовується в зонах з більш-менш постійними деформаціями або напруженнями, а також в областях, які не потребують детального аналізу. При створенні КЕС бажано враховувати симетрію або циклову симетрію завдання, якщо вона є. Зокрема, симетрія відносно площини дозволяє зменшити кількість КЕ вдвічі; циклічна симетричність – у багато разів. У разі осьової симетрії завдання скорочується її розмірність і зменшується кількість рівнянь, що описують стан моделі і, відповідно, тривалість розрахунків. Однак необхідно врахувати, що такі моделі можуть використовуватися для навантажень, які також мають

відповідну симетрію. Наступний етап створення моделі – формулювання і завдання початкових і граничних умов: теплових, кінематичних, силових. Залежно від поставленого завдання, під навантаженням розуміють не тільки прикладені зосереджені або розподілені сили і моменти, а й лінійні і кутові переміщення.

Моделювання навантаження, що діє на відновлювану поверхню деталі, здійснювали за допомогою, так званих, «жорстких» матеріалів. При цьому в розрахунку не враховуються пружно – пластичні властивості відновлювану поверхню деталі, а задаються її характеристики інерції і обмеження по поступальному переміщенню.

Залежно від типу завдання (тепловий аналіз, статичне навантаження) задавали необхідні фізико-механічні властивості матеріалу кінцевих елементів: коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, коефіцієнт лінійного подовження, щільність, модуль Юнга, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона та інші. Для моделей відновлюваних поверхонь з покриттями вибирали матеріал деталі, матеріал покриття, їх фізико-механічні властивості. Побудова моделі деталей з покриттями в середовищі MSC «Visual NASTRAN» для Windows засноване на редагуванні «твердотільних примітивів» або шляхом «видавлювання» (для отримання геометрії покриття) відповідних частин плоскою геометричної поверхні. Розроблено розрахункові моделі для визначення геометричних параметрів покриття таких як: товщина, форма, щільність, пропорції геометричних розмірів, що забезпечують їх рівність.

3.12 Втомні випробування відновлених поверхонь з покриттями

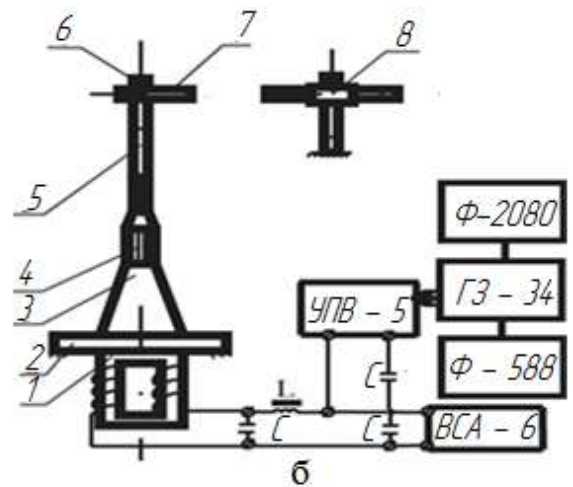
Втомна міцність деталей з покриттями визначає їх довговічність під дією циклічного навантаження [489 – 495]. Руйнування може наступити при напруженнях, значно менших, ніж межа міцності, якщо їх прикладати по черзі з різними знаком [489 – 491]. Явище, при якому в результаті циклічного

навантаження матеріали руйнуються, називаються втомою [491]. Дослідження втоми поверхонь з покриттями (без покриттів) проводилося на модифікованій магніострикційному установці (рис. 3.20, а) [492, 493], схема якої представлена на рис. 3.20, б.

Магніострикційний ефект [492, 493] в установці реалізується використанням нікелевих пластин товщиною 0,1 мм, зібраних в пакет, який утворює вібратор 1 (рис. 3.20, б).



а



б

Рисунок 3.20 – Магніострикційна установка (а) і її схема (б) для випробувань на витривалість

Змінне магнітне поле вібратора створюється пропусканням через його обмотку змінного струму, частота якого дорівнює робочій частоті установки. Обмотка служить для збудження в пакеті постійного магнітного потоку. Охолодження вібратора, який нагрівається при роботі в результаті втрат на гістерезис і вихрові струми, а також внаслідок нагріву струмом його обмоток, проводиться проточною водою. Вібратор поміщається в герметичний бак, прикріплений до опорної плити установки. Амплітуда коливань вібратора максимальна на його торцях (пучності переміщень) і дорівнює нулю посередині (вузол). Для збільшення амплітуди коливань вібратора застосовується концентратор 3. Концентратор 3 – стрижень змінного

перетину з фланцем 2, який розташований в вузловому перерізі стержня. Фланець використовується для кріплення концентратора і всієї коливальної системи до опорної плити. Робоча частота установки становить $9,8 - 0,8$ кГц.

На установці використовується концентратор зі сталі 45, котрий представляє собою циліндр. Діаметри торців концентратора 2 дорівнюють 24 мм і 120 мм. Для подальшого збільшення амплітуди коливань з концентратором 3 за допомогою накидної гайки 4 з'єднаний ще один напівхвильовий концентратор 5, конструктивно виконаний у вигляді двоступеневого циліндричного стрижня з титанового сплаву. Кожна із ступенів його має постійний перетин з діаметром верхньої частини 7,5 мм і нижньої – 24 мм. Сполучення між ступенями виконано у вигляді переходу, тому довжина нижньої частини коротше верхньої. Загальна методика розрахунку концентратора дана в роботі [491]. Із застосуванням додаткового ступеневого концентратора максимальна амплітуда коливань на крайньому торці системи досягає близько 200 мкм, що виявилось цілком достатнім для успішного проведення випробувань на витривалість.

Електрична частина установки (рис. 3.24, б) складається з генератора типу ГЗ – 34, лічильника циклів Ф – 588, частотоміра Ф – 2080, джерела постійного струму – випрямляча ВСА – 6. Схематично зв'язок між ними показаний на рис. 3.24, б. При випробуваннях здійснюється незалежне збудження коливань системи. Її частота визначається настроюванням, що задається, і вимірюється електронним частотоміром. Необхідна амплітуда коливань зразка 7, що закріплюється на торці концентратора 5 за допомогою гайки 6 (рис. 3.24, б), встановлюється шляхом зміни вихідної напруги звукового генератора, що подається на потужний підсилювач. Узгодження вихідного трансформатора потужного підсилювача УПВ – 5 з вібратором вироблялося шляхом підбору оптимальної кількості витків обмотки вібратора за умови отримання максимальної амплітуди коливань вібратора. Включення дроселя L і ємності C так, як показано на рис. 3.20, допускає паралельне з'єднання потужного підсилювача, джерела постійного струму і обмотки

вібратора. Ємність C_k включається паралельно обмотці вібратора, так що в контурі " C_k – індуктивність вібратора" має місце резонанс струмів, що поліпшує умови узгодження вібратора з потужним підсилювачем. Величина сили струму підмагнічування задавалася близько 15А при напрузі 2 – 3В. Для вимірювання амплітуди коливань зразка 7 в процесі випробувань використовується мікроскоп 8 з набором об'єктивів і окулярів. Знижуючи або підвищуючи амплітуду коливань, при певному числі циклів навантаження, встановлюється необхідний для втомного руйнування зразків рівень напруг. Зв'язок між амплітудою будь-якої точки, що коливається зразка і напруженнями, що діють в ньому, встановлюється шляхом відповідних розрахунків на основі теорії коливань [493 – 495].

3.13 Випробування на тертя і зношення

В якості триботехнічних характеристик була обрана величина зносу [496, 497]. Випробування на тертя і знос проводили на кафедрі машинознавства Національного авіаційного університету, на модернізованій машині типу 2070 СМТ- 1 (рис. 3.21).

Машина складається з випробувальної установки, пульта управління і системи збору інформації, даних для реєстрації в ПК (рис. 3.21, а – г). Випробування на тертя і знос полягало в стиранні пари зразків (рис. 3.25, г), які притискалися із заданою силою один до одного (рис.3.21, в). Під час випробувань реєструється частота обертання, момент тертя, сила стиснення, величина зносу і число циклів напруцювання. Запропонований програмно-технічний комплекс для вимірювання обраних триботехнічних характеристик дозволяє управляти вимірювальним стендом, вводити експериментальні значення, виділяти критичні точки, проводити розрахунки в реальному масштабі часу, графічно або чисельно представляти отримані дані, архівувати масиви інформації в зручному для аналізу форматі . Можливий запис температури і проведення випробувань в різних середовищах. Система

збору даних дає можливість вести одночасну реєстрацію за десятьма параметрами в числових значеннях і графічне відображення зі збереженням отриманих результатів у програмах Microsoft Word і Microsoft Excel.

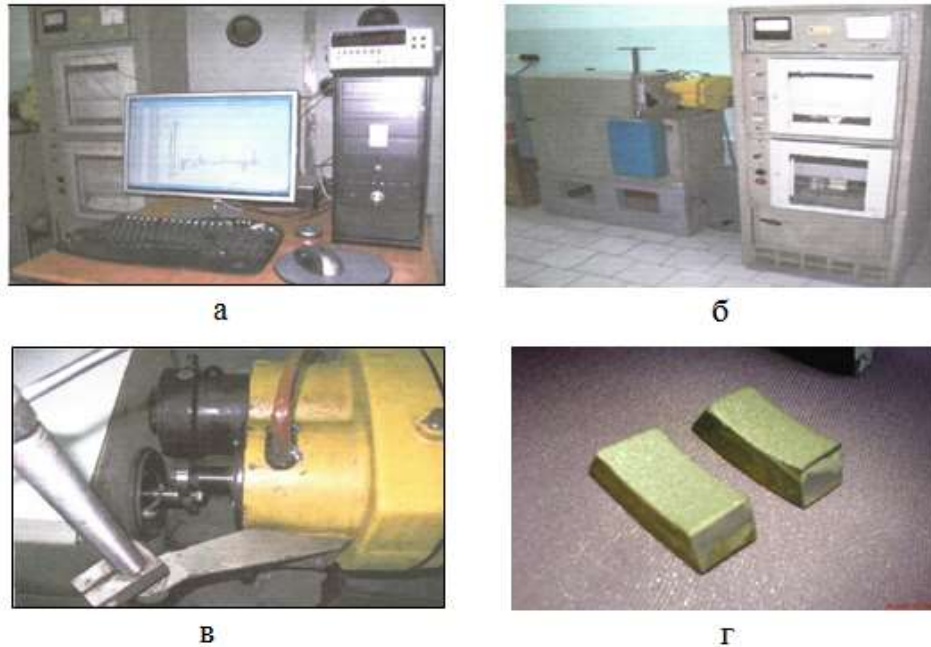


Рисунок 3.21 – Машина (а, б, в) і зразки (г) для випробувань на тертя і знос з протоколами в ПК (а)

Для проведення триботехнічних випробувань були обрані дві схеми взаємодії [498 – 506]:

– «пальчиковий індентор – диск» при зворотно – поступальному переміщенні контактуючих тіл. Схема дозволяє реєструвати коефіцієнт тертя в умовах тертя ковзання, а також використовувати зразки з поверхнею, зручною для досліджень структурно – фазових перетворень в поверхнях тертя;

– «пальчиковий індентор – диск» при однобічному обертанні диска. Схема дозволяє проводити випробування на тертя ковзання в широкому діапазоні навантажень, швидкостей і температур випробувань.

Номінальний контактний тиск випробувань становила 3 МПа. Питома навантаження випробувань становила 0,64 – 1,5 МПа. Випробування проводили до досягнення 10000 циклів (шлях тертя 150 – 500 м) з

визначенням вагового зносу зразка. Опір зносу визначалося по реєстрованій величиною лінійного зношування. Величина зносу зразків також визначалася по втраті ваги при випробуваннях. Вимірювання величини зносу зразків здійснювалося ваговим методом з використанням аналітичних ваг АДВ – 200 М. Зважування кожного зразка проводилося не менше 2 – 3 разів. Похибка вимірювання маси зразка становила 0,05 мг. Шлях тертя становив 5000 – 8000 м.

3.14 Методика обробки результатів досліджень

Оцінку точності експериментальних результатів, які містять систематичні і випадкові помилки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики [323-325] в наступній послідовності.

Вибіркове середнє:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.11)$$

де x_i – результат i – го вимірювання; n – число вимірювань.

Вибіркова дисперсія:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n \times (n-1)} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

Сумарна похибка:

$$\sigma_{\bar{a}} = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{від}}^2 + \sigma_{\text{обч}}^2} \quad (3.13)$$

де $\sigma_{\text{пр}}$ – похибка приладу; $\sigma_{\text{від}}$ – похибка відліку; $\sigma_{\text{обч}}$ – похибка обчислень

Систематична похибка не оцінювалася. Тоді можна обчислити півширину інтервалу:

$$D_x = t_{a,n-1} \times S \quad (3.14)$$

де $t_{a,n-1}$ – коефіцієнт Стьюдента

Відносна похибка вимірювання:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta x}{\bar{x}} \right) \times 100\% \quad (3.15)$$

Довірчий інтервал:

$$\mu = \bar{x} \pm \Delta x \quad (3.16)$$

3.15 Висновки до розділу 3

1. Запропоновано методикау експериментальних досліджень у вигляді сукупності підходів до вирішення поставленої проблеми. Розроблено комплексний методологічний підхід відновлення робочих поверхонь деталей комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, який включає ЕІЛ, ЕДН, ПА. Досліджено фізико – механічні і експлуатаційні властивості системи «відновлена поверхня – покриття».

Показано, що системність і комплексний методологічний підхід щодо визначення закономірностей впливу режимів комбінованого способу відновлення багатофункціональних покриттів на їх фізико-механічні властивості, дозволяють логічно впорядкувати складні теоретичні і експериментальні дослідження на спільній методично – інформаційній базі.

2. Для дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень в покриттях, отриманих комбінованим методом відновлення використовували фізичні методи досліджень: оптичну металографія,

рентгеноструктурний аналіз, РЕМ і кількісну стереофрактографію. Дослідження мікроструктури покриттів проводилося на нетравленій і травлених шліфах на мікроскопі «MeF3» фірми «Reichert» (Австрія). Визначення хімічного складу покриттів, недосконалостей і включень проводили з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу і електронного мікрозонду MS – 46 «Cameca». Порівняння і перевірку отриманих результатів здійснювали за допомогою скануючого електронного мікроскопа «Нанолаб-7» і мікрорентгеноспектрального аналізатора AN 10000 за програмою кількісного аналізу ZAF4-FLS. Кількість залишкового аустеніту, мартенситу та інших складових сталей визначали рентгеноструктурним аналізом і електронною мікроскопією.

3. Визначення розподілу елементів здійснювали методом скануючої електронної мікроскопії (SEM) на скануючому електронному мікроскопі «CamScan», з рентгенівським енергодисперсійним аналізатором. Для дослідження розподілу елементів в покритті застосовували зйомку в рентгенівському випромінюванні за програмою «Smart map».

Для дослідження фазових і структурних перетворень в напилених шарах використовувався рентгеноструктурний аналіз. Рентгенівська зйомка здійснювалася на дифрактометрі ДРОН – 3.0 в монохроматизованому $\text{CoK}\alpha$ випромінюванні. Фрактографічні дослідження проводилися з використанням методу РЕМ на мікроаналізаторах «Camscan – 4DV». Фотографічні зображення топографії поверхонь з покриттями отримували з використанням скануючого растрового електронного мікроскопа «Нанолаб – 7». Шорсткість поверхонь оцінювали величиною мікронерівностей R_a , яку визначали за допомогою профілограм, знятих на профілографі – профілометри моделі 201 і «Talysarf-5». Метод кількісної стереофрактографії дозволяє кількісно оцінити морфологічні особливості поверхні після ЕІЛ, геометричні параметри рельєфу поверхні, її фазовий склад, пов'язаний з морфологічними особливостями. Для отримання стереоскопічних пар використовувався растровий електронний мікроскоп із залученням апарату фотограмметрії.

4. Визначення пористості є основним засобом оцінки якості покриттів. Оцінити розподіл пор за обсягом покриття, визначити їх форму і розміри дозволяє планіметричний метод металографічного аналізу. Для обрахунку пористості були зроблені фотографії шліфів на скануючому електронному мікроскопі «Нанолаб – 7». Для підтвердження результатів визначення пористості використовували кількісний стереологічний аналіз на автоматичному аналізаторі зображення «Mini – Magiscan» за програмою «Genias 26». Обробка результатів аналізу зображення проводиться за програмою «Results», яка дала можливість статистичного аналізу результатів вимірювань і побудувати гістограми. Для оцінки корозійної стійкості покриттів використовували потенціодинамічний метод. Вимірювання мікротвердості поверхні з покриттям із захопленням перехідної зони проводилося на Мікротвердоміри «Micromet – II» (фірма Buchler (Швейцарія)). Доцільність використання методу нанесення покриття оцінювали адгезійною міцністю. Адгезійна міцність – одна з найбільш важливих експлуатаційних характеристик. Вперше, для поверхонь з покриттями, отриманими комбінованим методом, використовували експериментально-розрахункову методику, що дозволяє за одне випробування на одному зразку визначити адгезійну і когезійну міцність системи «покриття – основа». Для розрахунку НДС в системі «основа – покриття», вирішення складних завдань механіки деформованого твердого тіла, виконання розрахунків ЕК на міцність і оптимізацію конструкції по граничним напруженням використовували програмний комплекс NASTRAN на основі методу МКЕ. При розрахунку НДС композиції «відновлена поверхня – покриття» враховувалися її геометричні параметри; властивості матеріалів; навантаження, що діють на систему. Залишкові напруження в покриттях оцінювали методом графічного диференціювання, виходячи з принципу еквівалентності навантаження адгезійного зв'язку. Цей принцип дозволяє встановити функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, залишковими напруженнями і деформацією основи.

Наявність інформації про величину і знак залишкових напружень дозволить підвищити міцність і надійність відновлених деталей з багатофункціональними покриттями. Дослідження втомі проводили на модифікованій магніострикційній установці. Необхідний для втомного руйнування зразків рівень напружень встановлювали при певному числі циклів навантаження.

5. Випробування на тертя і знос проводилися на модернізованій машині типу 2070 СМТ – 1. Реєстрування триботехнічних характеристик (величини зносу, числа циклів напрацювання, моменту тертя) здійснювалося програмно – технічним комплексом. Інтенсивність зношування розраховувалася за результатами оцінки убутку маси зразка, яка визначається аналітичними вагами АДВ – 200. Оцінку точності експериментальних результатів, які містять систематичні і випадкові помилки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [5, 7, 9, 13, 14, 33, 34, 36].

РОЗДІЛ 4

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ, ВІДНОВЛЕНИХ ШЛЯХОМ
НАНЕСЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ
КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ

Основними теоретичними і експериментальними проблемами, які гальмують реалізацію потенційних можливостей комбінованих, інтегрованих та гібридних способів нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення та підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ, є відсутність науково – методологічного аналізу і синтезу процесів відновлення і модифікації поверхневого шару КЕ деталей ЗТ з метою підвищення їх фізико – механічних характеристик.

З інтегрованих технологій значний ефект по несучій здатності забезпечують дуплексні (комбіновані) покриття [25, 166, 167], що забезпечують підвищення твердості, зносу – і корозійної стійкості, понижують вірогідність пластичної деформації деталей в умовах контактного навантаження, забезпечують підвищення несучої спроможності і межі витривалості системи «відновлена поверхня – покриття» [25, 166, 167].

У розділі запропоновано для відновлення КЕ деталей ЗТ застосувати комбінований спосіб формування багатофункціональних покриттів, що включає процеси ЕІЛ, ЕДН, ПА; обґрунтовано доцільність його використання, представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень [1, 4]. Критерієм вибору складу комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів було порівняння витрат і комплексу механічних властивостей відновлених деталей. При виборі первинних методів, що входять до складу комбінованого способу створення багатофункціональних покриттів, вирішальним фактором була наявність обладнання та можливість його інтеграції в єдиний технологічний цикл.

4.1 Схема покриття, отримана комбінованим методом, і технологічні способи його формування при відновленні поверхонь деталей ЗТ

Схема покриття, отриманого комбінованим способом відновлення (рис. 4.1 а), і основні етапи його отримання представлені на рис. 4.1 б, в, г:

– перший етап – обробка відновлюваних поверхонь ЕЛ при одночасному нанесенні підшару з ніхрому (Х20Н80) з метою підвищення міцності зчеплення (адгезійної міцності) ЕДН – покриття (рис. 4.1 б);

– другий етап – нанесення покриттів ЕДН дротяних сталей 40Х13/Х18Н10Т шляхом розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші (рис. 4.1 в);

– третій етап – обробка ЕДН – покриттів ПА (рис. 4.1 г).

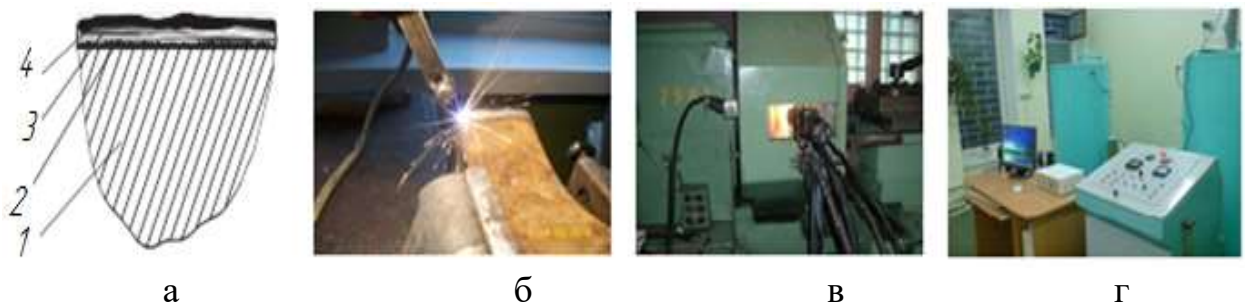


Рисунок 4.1 – Отримання багатофункціональних покриттів комбінованим методом: а – схема покриття; б – попередня обробка відновлюваної поверхні ЕЛ; в – ЕДН (HVOF Arc Spraying) покриттів; г – ПА напилених покриттів; 1 – основа (відновлювана поверхня); 2 – прошарок з Х20Н80; 3 – ЕДН - покриття з дротяних сталей 40Х13/Х18Н10Т; 4 – шар напиленого покриття після ПА

4.2 Вплив процесу електроіскрової обробки поверхонь, що відновлюються на адгезійну міцність ЕДН – покриттів

Можливості методу ЕЛ (рис. 4.1 б) – не тільки зміцнення відновлюваних поверхонь, але і їх обробка перед нанесенням покриття ЕДН

для підвищення адгезійної міцності системи «напилене покриття – відновлена поверхня».

Аналіз технічних характеристик основних методів, що застосовуються для обробки поверхонь перед ЕДН покриттів, і кількісний стереофрактографічний аналіз структурних і морфологічних особливостей поверхневих шарів сталей після електроіскрової обробки ЕІЛ, показав (табл. 4.1), що метод ЕІЛ забезпечує найвищу міцність зчеплення напиленого покриття з відновлюваною поверхнею. При ЕІЛ міцне зчеплення між покриттям і відновлюваною поверхнею забезпечувалося за рахунок підвищення шорсткості (рис. 4.2). (рекомендована шорсткість поверхні R_a перед ЕДН становить 63 – 120 мкм).

Електроіскрова обробка відновлюваних поверхонь перед нанесенням покриття ЕДН дозволяє курувати значеннями адгезійної міцності системи «відновлювана поверхня – покриття» в широких межах шляхом зміни хімічного складу поверхневого шару при використанні різних матеріалів в якості електрода.

Таблиця 4.1 – Вплив способу підготовки відновлюваної 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 різьби	100 – 140	80 – 120
Нанесення насічок	100 – 120	80 – 100
Електроіскрова обробка	120 – 150	63 – 80

Нанесення підшару з ніхрому (Х20Н80), молибдену або нікелю ЕІЛ позитивно впливає на адгезійну міцність напилених покриттів (рис. 4.2).

Метод ЕІЛ заснований на використанні концентрованого потоку енергії плазмового струменя іскрового розряду. ЕІЛ відрізняється простотою технологічної операції, що здійснюються на повітрі, малими габаритами

обладнання, застосовуванням для зміцнення і обробки деталей ЗТ різної форми і розмірів. Доцільність вибору ЕІЛ як метода обробки поверхні перед напиленням видно по двом економічними показниками - витраті електроенергії і вартості комплекту обладнання (табл. 4.2).

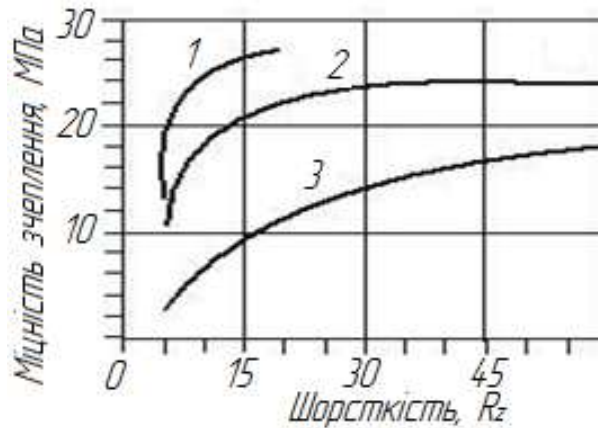


Рисунок 4.2 – Вплив шорсткості відновлюваної поверхні експериментальних зразків на міцність зчеплення покриттів: 1 – підшар – ніхром; 2 – підшар – молибден; 3 – підшар – нікель

Таблиця 4.2 – Економічні та енергетичні показники технологій обробки для зміцнення

Методи обробки для зміцнення	Показники			
	Витрати електроенергії		Вартість обладнання	
	тис. кВт. год.	економія, крат.	тис. гривен	відношення, крат.
ХТО	5550	1	324,6	1
ЛО	116	48	732	дорожче у 2,25 рази
ЕІО (ЕІЛ)	3,9	1420	30	дешевше у 10,8 рази

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:

$$g = E \times k \times f \times t, \quad (4.1)$$

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

– всі матеріали утворюють ряд за ерозійною стійкістю.

4.3 Керування факторами процесу електродугового напилення покриттів для підвищення властивостей відновлюваних поверхонь

4.3.1 Основні підходи управління процесом ЕДН для підвищення експлуатаційних властивостей деталей ЗТ

Електродугове напилення покриттів – основна операція процесу відновлення деталей ЗТ комбінованим методом (рис. 4, в). ЕДН здійснювалося за такими режимами [32]:

– режим 1 – розпилення металу, розплавленого 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.

Схема нанесення покриття складається з наступних елементів: подачі

металу (сировини) до місця плавлення; нагрівання металу до розплавлення; диспергування металу; надання металевим частинкам значної швидкості; удар прискорених частинок о поверхню деталі, їх деформація і закріплення; охолодження частинок, які закріпилися і всього покриття в цілому.

В якості матеріалу покриття використовували дрiт діаметром 2 мм зі сталей 40X13 і аустенітного класу X18H10T.

Термін служби відновлених деталей визначається якістю ЕДН – покриттів, на які істотно впливають цілий ряд параметрів технологічного процесу ЕДН: режим напилення (величина струму, тиск і витрата розпилювального газу, дистанція напилення, швидкість переміщення ЕДН – апарату); діаметр, хімічний склад і швидкість подачі дроту; спосіб обробки поверхонь, відновлених ЕДН [32]. Вищевказані технологічні параметри визначають чинники, які впливають на кінетику і структуроутворення відновлених поверхонь [8, 43]. До них відносяться: параметри газотермічного потоку (діаметр, швидкість і температура газу і частинок розпилюємого матеріалу ЕДН-покриттів, ступінь їх окислення); склад і властивості несучої середовища і матеріалу покриттів; шорсткість і температура відновлюваної поверхні.

Впливати на кількісні і якісні характеристики фізико – хімічних взаємодій при напиленні і на експлуатаційні властивості відновлюваних деталей ЗТ можна шляхом управління параметрами процесу ЕДН – покриттів, які узагальнені і схематично представлені на рис. 4.3 [5,32, 33].

В розділі запропоновані основні підходи управління процесом ЕДН: складом і властивостями несучого середовища (транспортуючого газу) і матеріалом покриття, швидкістю і температурою суміші і частинок розплавленого матеріалу, що розпилюються, для підвищення експлуатаційних властивостей і терміну служби деталей ЗТ.

Експериментальні дослідження процесу відновлення проводили при наступних параметрах ЕДН: напруга – 30 – 32 В; сила струму – 200 – 300 А;

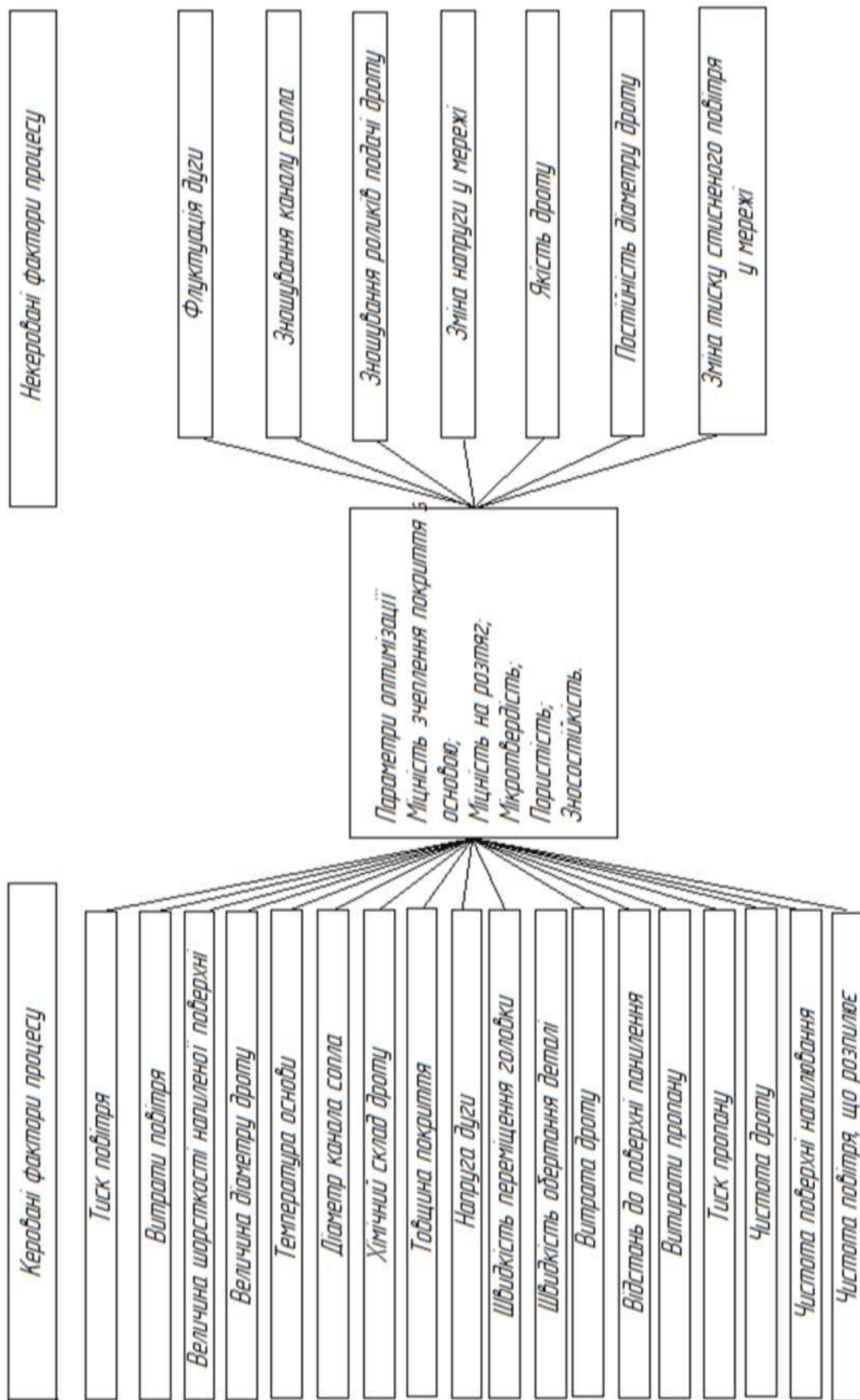


Рисунок 4.3 – Технологічних параметри нанесення покриття ЕДН

дистанція 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 [32].

4.3.2 Моделювання процесу ЕДН. Отримання залежностей для прогнозування параметрів напилення і аналітичної оцінки їх впливу на якість відновлення

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.

При відновленні деталей ЗТ шляхом ЕДН покриттів можна розширити можливості регулювання процесу напилення 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 становила 120 – 130 м/с (режими 1,4) і 400 – 500 м/с (режими 2,3). Розміри частинок, з яких формувалися покриття, перебували в межах 15 – 40 мкм [32].

Використанням в якості транспортуючого газу замість повітря продуктів згорання пропано – повітряної суміші (табл. 4.3) 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 вигорання легуючих елементів [32].

Таблиця 4.3 – Вплив складу горючої суміші, що утворюється факелом розпилу, 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 – кисень (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 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. 4.3). Збільшення кількості повітря в суміші з палим газом призводить до зменшення вмісту вуглецю в покритті (табл. 4. 3).

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.

В розділі запропоновані основні підходи управління процесом ЕДН: складом і властивостями несучого середовища (транспортуючого газу) і матеріалом покриття, швидкістю і температурою суміші і частинок розплавленого матеріалу, що розпилюються, для підвищення експлуатаційних властивостей і терміну служби деталей ЗТ.

При ремонті деталей ЗТ ЕДН доцільно розширити можливості регулювання процесу за рахунок зміни складу транспортує газу, що впливає на температуру, швидкість і окислювальну здатність газового потоку (табл. 4.4).

Використання в якості розпилювального газу продуктів згорання пропано – повітряної суміші дозволяє значно знизити окислення металу, що напилюється і вигорання легуючих елементів. Варіюванням витрат пропану і повітря можна створювати нейтральну або відновну атмосферу в зоні плавлення електродного дроту і тим самим знижувати окислення металу і вигорання легуючих елементів. Так, при коефіцієнті згорання палива $b = 0,4$ кількість вуглецю в покритті, отриманому з дротів мартенситного (40X13) і аустенітного (X18H10T) класів практично не відрізняється від його вмісту у вихідному дроті.

Таблиця 4.4 – Вплив складу горючої суміші на максимальну швидкість і температуру газового струменя

Пальне	Максимальна температура полум'я газів та парів рідини у суміші, °С		Максимальні швидкості витоку (м/с) із сопла при тиску перед критичним перерізом струменя (МПа)					
	З повітрям	З киснем	0,2	0,6	1,0	0,2	0,6	1,0
			Окислювач – кисень			Окислювач – повітря		
Ацетилен	2323	3150	1125	1700	1850	1050	1540	1630
Пропан	1925	2700	1040	1560	1710	940	1400	1500
Прир. газ	1875	2400	950	1440	1550	890	1380	1470
Керосин	1930	2450	950	1440	1550	945	1410	1520
Бензин	1970	2550	970	1480	1600	960	1480	1545

При однаковому ставленні повітря і пропану вуглецю в покритті вдвічі менше, ніж у вихідному матеріалі, а при розпиленні чистим повітрям вміст вуглецю зменшується майже в три рази (табл. 4.5). Зміст вуглецю в електродугових покриттях складає близько 50 % від його первинної кількості

в сталевих дротах. При коефіцієнті надлишку повітря в горючій суміші, α , що знаходиться в межах від 0,8 до 1,0 відбувається коксування покриття.

Відсутність кисню в якості окислювача палива значно знижує собівартість нанесених покриттів і підвищує надійність і безпеку проведених робіт. Кількість кисню в покриттях зростає зі зменшенням вмісту пропану в горючій суміші (табл. 4.5). Так підвищення коефіцієнта надлишку повітря в горючій суміші, α від 0,8 до 1,7 викликає зростання процентного вмісту кисню в покриттях від 1,3 до 3,5%. Збільшення кількості повітря в суміші з паливим газом призводить також до зменшення вмісту вуглецю в покритті (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Вплив складу горючої суміші, що утворюється факелом розпилу ЕДН і ГПН на вміст вуглецю і кисню в покриттях із сталі 40Х13

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

Процес відновлення деталей ЗТ ЕДН, при якому розпилення металу здійснювалося струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші характеризується [490]:

- підвищенням швидкостей розплавлених частинок (табл. 4.4);
- зниженням середнього розміру часток в 4 – 7 разів;
- підвищенням температури струменя розпилу (табл. 4.4);
- збільшенням кількості осідають частинок уздовж відновлюваної поверхні деталі і налипання на її мікрориступи (рис. 4.5).

При малій швидкості руху апарату для електродугового напilenня і при великій щільності струму дуги «нарости» на мікрориступів (рис. 4.4)

збільшуються і в місцях їх утворення спостерігається різке збільшення розміру пор. Збільшення швидкості переміщення електродугового апарату призводить до зменшення розмірів «наростів». В результаті частки рідкого металу, на яких формується шар покриття, б'ючись об такій невеликій «наріст» під дією тиску і можуть повністю заповнити пори в ньому, здійснюючи як би його просочення рідким металом, що веде до помітного зменшенню пористості всього напиленого шару покриття.

Для того щоб вибрати найбільш оптимальний режим ЕДН для досягнення максимальної якості та ресурсу відновлюваних поверхонь деталей ЗТ досліджували фізико – хімічні процеси, які проходили під час розпилювання металевих частинок і нанесенні їх на відновлювану поверхню.

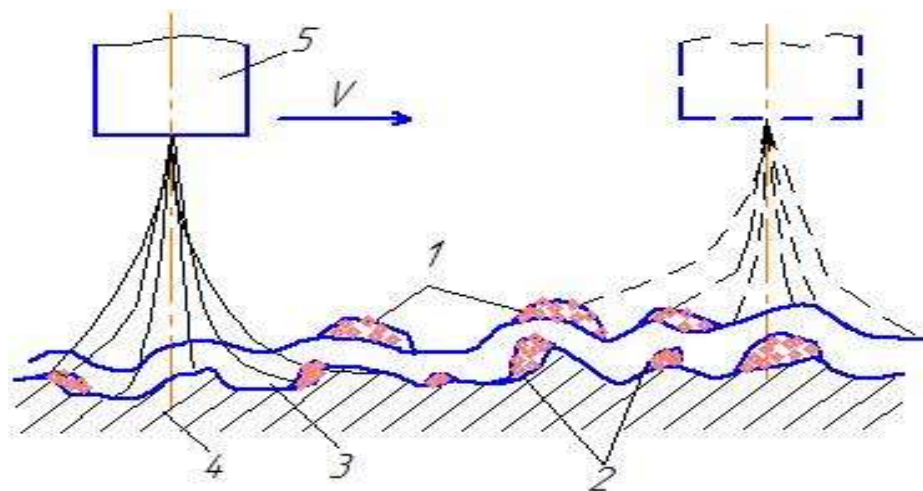
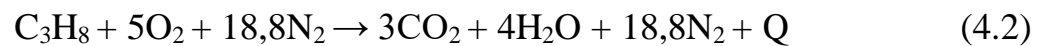


Рисунок 4.4 – Схема формування покриття при електродуговому напиленні струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші:

- 1, 2 – «нарости» на мікровиступах; 3 – шар напиленого покриття;
- 4 – відновлювана поверхня; 5 – розпилювальна головка електродугового апарату

Отримані залежності, що дозволяють прогнозувати параметри ЕДН (температуру і швидкості руху матеріалу, що напилюється і розпилювального газу) і дають можливість аналітично оцінити їх вплив на якість відновлюваної поверхні. Температура горіння пропано – повітряної

суміші залежить від її складу, температури повітря і газу. Калориметрична температура горіння T_k підраховується без урахування втрат тепла внаслідок дисоціації продуктів горіння. Теоретична температура горіння T_m визначається з урахуванням тепла дисоціації продуктів горіння. При розрахунку температури полум'я вважають, що процес горіння - адіабатичний і при цьому - весь кисень повітря бере участь в реакції горіння. Реакція горіння пропану відбувається за рівнянням:



Розрахунок калориметричної температури горіння T_k виконували методом послідовних наближень. Задається температура $2100^\circ C$ і по теплофізичних таблицями визначається теплоємності для CO_2 , H_2O і N_2 :

$$T_k = T_1 + (Q_p^n - Q_{p_1}) \times \frac{T_2 - T_1}{Q_{p_2} - Q_{p_1}} \quad (4.3)$$

Підраховуємо, якою теплотворною здатністю володів би пропан, якби при його згоранні температура дорівнювала $2100^\circ C$. Теплотворна здатність пропану $Q_p^n = 22800$ ккал/м³. Отже, T_k пропану вище $2100^\circ C$. Задаємося температурою $2200^\circ C$ і робимо аналогічний розрахунок: $Q_{p_2} = 22645$ ккал/м³.

Калориметрична температура горіння пропано - повітряної суміші $T_k > 2215^\circ C$. Теплоємність продуктів горіння i_1 і i_2 , ккал/м при температурі $T_B = 2000^\circ C$ і $T_H = 1800^\circ$, відповідно.

Розрахункова температура горіння T_p відрізняється від калориметричної тим, що при визначенні T_p враховується теплота дисоціації продуктів горіння. Всі теплові розрахунки проводяться при коефіцієнті надлишку повітря, $a \geq 1$. Температура продуктів згорання має максимальне значення при, $a < 1$ (при нестачі окислювача). Це пояснюється тим, що продукти згорання при, $a < 1$, то більша кількість CO . Витрати тепла на

дисоціацію знижуються при, $\alpha < 1$, що і призводить до підвищення температури полум'я. Надлишок пропану створює відновну захисну атмосферу в розпорошувати потоці. Коефіцієнт надлишку повітря визначали за формулою:

$$\alpha = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}}^0} \quad (4.4)$$

де $V_{\text{п}}$ - обсяг повітря, що надійшов м^3 ; $V_{\text{п}}^0$ - теоретичний об'єм повітря, необхідний для 1 м газу, $V_{\text{п}}^0 = 23,8 \text{ м}^3$

Коефіцієнт надлишку повітря α можна також визначати через витрати повітря і пропану:

$$\alpha = \left(\frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{пр}}} \right) / 23,8 \quad (4.5)$$

де $G_{\text{п}}$ – витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$; $G_{\text{пр}}$ – витрати пропану, $\text{м}^3/\text{год}$.

Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{\text{п}} = 0,4$ відповідає нижній межі займання. Графіки, що відображають вплив коефіцієнта надлишку повітря, в горючій суміші на температуру продуктів горіння і початкову швидкість струменя продуктів горіння представлені на рис. 4.5.

За допомогою отриманих залежностей встановлено, що збільшення швидкості і температури струменя транспортуючого газу і частинок дозволяє зменшити діаметр розпилюємих крапель і тим самим підвищити щільність і знизити окисленість відновлених поверхонь, що забезпечить їх максимальну якість.

Отримані залежності дозволили визначити, що одним з важливих технологічних параметрів при відновленні поверхонь деталей ЗТ ЕДН покриттями є дистанція напилання.

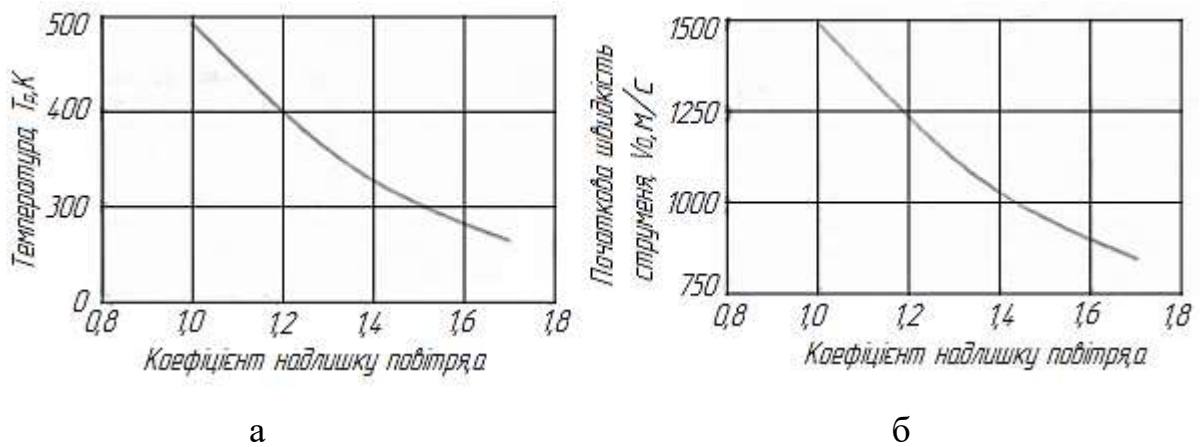


Рисунок 4.5 – Вплив коефіцієнта надлишку повітря α в горючій суміші на температуру продуктів горіння (а) і початкову швидкість струменя продуктів горіння V_0 (б)

З одного боку, підвищення дистанції сприяє підвищенню швидкості частинок, з іншого - призводить до підвищеного окислення часток і зниження їх температури. Оптимальний діапазон дистанції напилення знаходиться в діапазоні 80 – 150 мм, що підтверджено результатами експериментальних досліджень.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при оптимальному режимі нанесення ЕДН – покриттів коефіцієнт надлишку повітря повинен складати, $\alpha = 1,0 - 1,1$, а дистанція напилення – 190 – 210 мм. При цьому, висока швидкість потоку при ЕДН обдуває дугу і забезпечує ефективне диспергування крапель розплавленого металу (табл. 4.6).

Згідно з результатами досліджень, представлених в табл. 4.6, найбільші фракції розпилюємих частинок розплавленого металу становлять мінімальну частку в загальній картині розподілу часток всіх фракцій. Отже, ЕДН – покриття на відновлених поверхнях досить щільні. Розподіл частинок металу, що напилюються за розмірами залежить від режиму напилення (напруги на електродах дуги, тиску стисненого повітря тощо) і виду металу, що напилюється.

Таблиця 4.6 – Масова доля частинок різної фракції

№	Фракція, мм	Маса, г	Мас. доля, %
1	Більше 0,63	0,081	0,1
2	0,63 – 0,40	1,204	1,52
3	0,40 – 0,315	1,012	1,28
4	0,315 – 0,20	11,930	15,14
5	0,20 – 0,16	11,000	14
6	0,16 – 0,10	22,021	28
7	0,10 – 0,063	21,450	27,25
8	Менше 0,063	10,012	12,7
Сума		78,710	100

Дисперсність частинок розпилюемого металу може бути визначена по формулі

$$d_{cp} = K_1 \times \left(\frac{3,75}{R_0} + 0,29 \right) \times \sqrt[3]{\frac{G}{\lambda \times \mu_2}} \quad (4.6)$$

де K_1 - коефіцієнт розмірності; R_0 – радіус повітряного сопла; G – продуктивність апарату в кг/с; γ – щільність напиленого металу в кг/м³; μ_2 – коефіцієнт рівномірності процесу пилоутворення

При ЕДН чим більше кут розкриття факелу розпилю, тим більше кількість частинок потрапляє на поверхню деталі під гострим кутом атаки і тим менше ступінь деформації частинок. В умовах високошвидкісного напилення відбувається зміна коефіцієнта зосередженості матеріалу в струмені в бік його збільшення, оскільки кут розбіжності двофазних надзвукових струменів менше, ніж дозвукових і становить 5 – 7°. Як наслідок, зменшується діаметр плями напилення і зростає коефіцієнт використання матеріалу (КВМ), досягаючи 0,85.

Отримані залежності і результати експериментальних досліджень були спрямовані на вирішення завдання управління параметрами газотермічного потоку: швидкістю і температурою газу і частинок, гранулометричним складом часток, властивостями частинок і несучого середовища з метою

отримання високих фізико – механічних і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь і терміну служби деталей ЗТ.

З метою підвищення якості та терміну служби відновлюваних деталей ЗТ ЕДН покриттями доцільно поряд з вирішенням задачі управління параметрами газотермічного потоку (швидкістю і температурою газу і частинок, гранулометричним складом часток, властивостями частинок і несучої середовища) керувати швидкістю переміщення ЕДН – апарату, відстанню між його соплом і відновлюваною поверхнею, тривалістю перерв між напиленням окремих шарів покриття, температурою деталей і покриття. Зазвичай відстань від сопла до відновлюваної поверхні становить 80 – 200 мм. Відрізок часу між нанесенням окремих шарів повинен бути якомога менше, щоб уникнути утворення окислів і осідання пилу, що перешкоджає зчепленню частинок між собою. Швидкість переміщення ЕДН – апарату вибирається таким чином, щоб за один прохід наносився шар покриття товщиною до 0,2 – 0,3 мм. Занадто повільне переміщення апарату викликає перегрів покриття і відновлюваної поверхні, що погіршує їх якість. Для високопродуктивного напилення, тобто при роботі на токах 400 А і більше, необхідна досить висока швидкість переміщення ЕДН – апарату щодо відновлюваної поверхні.

Для нанесення рівномірного по товщині покриття необхідно переміщати ЕДН – апарат в напрямку перпендикулярному до площині, що напиляється. Таким чином, рівномірність товщини шару покриття на відновлюваній поверхні деталі буде тим більше, чим менше швидкість руху апарату і чим більше кут розкриття факела і відстань між соплом апарату і поверхнею деталі.

Великою перевагою відновлення деталей ЕДН є можливість наносити покриття на холодну відновлювану поверхню деталі. Температура покриття не повинна перевищувати 200⁰С, щоб не викликати появи великої напруги і тріщин. Управління факторами, які стосуються дротяних матеріалів, що напилюються, зокрема діаметром, хімічним складом і швидкістю подачі

дротів, можна підвищити якість і термін служби відновлюваних поверхонь. Відповідно до проведених досліджень при використанні дроту діаметром менше 1,2 мм погіршується стабільність процесу ЕДН покриттів через мінливість положення точки схрещування дротів. Оптимальний діапазон діаметрів – 1,2 – 1,8 мм.

В роботі досліджувався вплив витрат розпилювального повітря на кількість кисню в напилених покриттях. Вміст кисню в ЕДН – покриттях в 2,5 – 3 рази більше, ніж в ГПН (рис. 4.6, рис. 4.7), 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. 4.7).

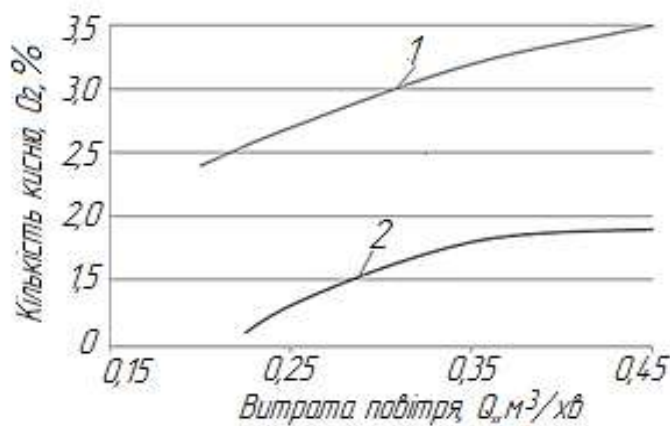


Рисунок 4.6 – Вплив витрат повітря, що розпилюється на кількість кисню в покриттях, отриманих за режимами 1 (1) і 2 (2)

Підвищення коефіцієнта надлишку повітря в горючій суміші від 0,8 до 1,7 викликає зростання вмісту кисню в покриттях від 1,3 до 3,5% (табл. 4.2). Коефіцієнт надлишку α повітря визначається за формулами (4.4) і (4.5).

В результаті досліджень встановлено, що при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0 - 1,1$ і при дистанції напилення – 80 – 150 мм швидкість потоку при ЕДН забезпечує ефективне диспергування крапель розплавленого матеріалу покриття. Дисперсність частинок матеріалу, що розпилюється, визначали за формулою (4.6).

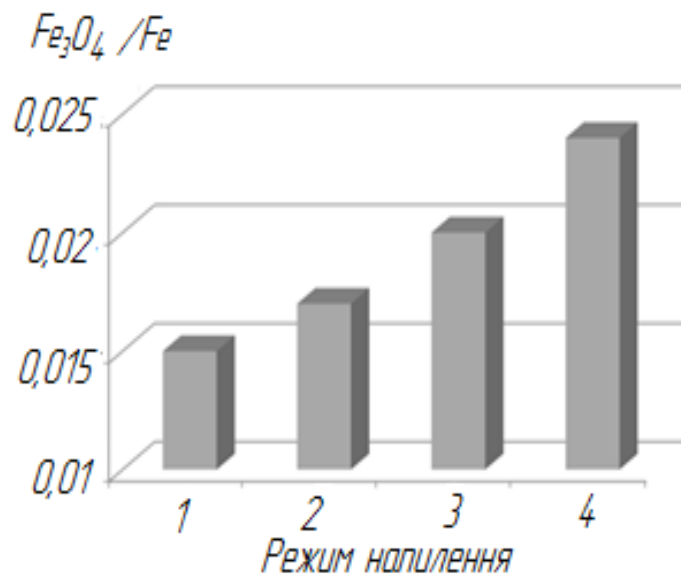


Рисунок 4.7 – Відносний вміст оксиду Fe_3O_4 в напилених покриттях: 1 – ГПН; 2 – ЕДН у відновлювальній атмосфері; 3 – ЕДН у окислювальній атмосфері; 4 – ЕДН струменем повітря

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 напilenня (напруги дуги, тиску стисненого повітря тощо) 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 4.2.

Розрахунок температури горіння T_k виконували методом послідовних наближень за рівнянням 4.3.

При температурі 2100°C теплотворна здатність пропану дорівнює $Q_p^n = 22800$ ккал/м³, а при температурі 2200°C – $Q_{p_2} = 22645$ ккал/м³. Температура горіння пропано – повітряної суміші $T_k > 2215^\circ\text{C}$:

$$T_k = T_n + (i_0 - i_2) \times \frac{T_B - T_n}{i_1 - i_2} \quad (4.7)$$

В рівнянні (4.7) теплоємність продуктів горіння i_1 та i_2 , ккал/м при температурі $T_B = 2000$ °C і $T_n = 1800$ °C, відповідно. Всі розрахунки проводили при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \geq 1$. Розрахункова температура горіння T_p 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 (4.2) – (4.7) 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.

При електродугову напиленні відбувається зниження кількості вуглецю і вигорання легуючих елементів в покритті, що призводить до зниження їх мікротвердості, що негативно позначається на твердості, зносостійкості, експлуатаційних характеристик і терміну служби відновлюваних деталей. Істотно підвищити ці властивості можна за допомогою ХТО, зокрема, азотування в імпульсному режимі [34, 271, 272].

4.4 Характеристика процесу азотування і імпульсному режимі, його особливості

Азотування в імпульсному режимі (ПА) - ефективний метод вирішення проблеми обробки відновлених поверхонь з напиленими покриттями при одночасному формуванні в них високоміцних поверхневих шарів і підвищенні їх експлуатаційних характеристик [32].

Метод ПА відрізняються технологічністю, екологічною безпекою і економічною ефективністю, тому він і був запропонований для обробки електродугових покриттів з одночасним їх модифікуванням для підвищення твердості, зносостійкості і експлуатаційних властивостей відновлених деталей ЗТ. Обробка ПА відбувається тліючим розрядом в суміші аргону з азотом. Цим усувається негативний вплив водню на серцевину деталі - водневе окрихчування і воднева корозія. На відміну від класичних технологій ХТО технологія ПА забезпечує нагрів тільки поверхневого шару на глибину, необхідну для його зміцнення. Циклічний характер нагріву виробу дозволяє скоротити в 2 – 5 разів потужність джерел електричного живлення і відносить технологію ПА до категорії енергозберігаючих [11, 516 – 523].

Технологія ПА не використовує пічні пристрої і має такі переваги: прискорює дифузійні процеси в 0,5 – 2 рази; дозволяє отримувати дифузійний шар регульованого складу і будови; характеризується незначними деформаціями деталей і високим класом чистоти поверхні. Екологічна перевага технології ПА полягає у відмові від використання аміаку [11, 516 – 523].

Головна особливість ПА - використання ефекту аномального масопереносу азоту на поверхні оброблюваної деталі, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення тліючого розряду [11, 516 – 523].

Обробка відновлених поверхонь з напиленими покриттями азотуванням в імпульсному режимі здійснювалася в вакуумі з використанням

в якості реакційного газу азоту і суміші аргон – водень на установці, розробленій в ІПП ім. Г.С. Писаренко НАН України (рис. 4.1 г) [11, 516 – 523]. Процес ПА включає в себе наступні етапи:

- підведення азоту з відповідного середовища до поверхні деталі з напиленим покриттям;
- створення прикордонного шару біля поверхні деталі, де на міжфазній межі середовище – метал відбувається дисоціація середовища, що містить азот, і адсорбція поверхнею атомів азоту;
- проникнення атомів азоту через поверхню в матеріал напиленого покриття;
- 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.

Параметри ПА напилених покриттів зі сталі 40Х13 мають таке значення: температура – 550 ± 30 °, тиск – 25 – 150 Па, час обробки – 10 годин, співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂. Охолодження деталей в камері до 150 – 200 °С при тиску 13,0 – 65 Па триває 1,0 – 2,0 год. Тиск і температура реакційного газу протягом процесу ПА не є постійними: тиск змінюється періодично з періодом 15 – 30 хв., а температура коливається в межах 25 – 35 °С. Для дослідження процесу ПА були визначені параметри, які найбільше впливають на мікротвердість і зносостійкість ЕДН – покриттів: час дифузійного насичення, тиск і склад реакційного газу, температура процесу дифузійного насичення, експлуатаційна температура (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Параметри ПА, що впливають на якість ЕДН-покриттів

Параметри та їх позначення	Значення
Час дифузійного насичення, хв. (X_1)	90 – 240
Тиск реакційного газу, Па (X_2)	25 – 250

Продовження таблиці 4.7

Параметри та їх позначення	Значення
Склад реакційного газу (X_3)	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Ar 95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ 380%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Ar
Температура газу, °К (X_4)	673 – 873
Експлуатаційна температура, °К (X_5)	678 – 867,3

Газовий режим ПА (табл. 4.8) забезпечує рівномірну обробку і зміцнення поверхонь (рівномірну товщину дифузійного шару) [515]. Після обробки відновлених поверхонь з напиленими покриттями азотуванням в імпульсному режимі утворюються тверді розчини азоту, завдяки яким підвищуються твердість відновленої поверхні на 20%, зносостійкість і довговічність деталей в 4 рази, межа втоми - на 25%. При цьому обробка відновлених поверхонь азотуванням в імпульсному режимі не змінює форми і розмірів деталей [7, 13, 36]. Тому обробка відновлених деталей ПА використовується як фінішна, без механічної обробки [512, 513].

Таблиця 4.8 – Газовий режим процесу ПА

№ експ.	Час дифузійного насичення, хв.	Тиск реакційного газу, Па	Склад реакційного газу	Температура газу, °К	Експлуатаційна температура, °К	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	Товщина дифузійного шару, мкм
1	180	125	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Ar	773	788	3700	288
2	150	200	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	725,5	10062	125
3	210	75	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Ar	673	850,5	9955	286
4	150	175	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Ar	873	819,2	8175	215
5	210	50	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Ar	773	694,3	10590	142
6	180	100	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5%Ar	673	881,8	8270	253
7	240	225	95%N ₂ - 5%С ₃ Н ₈	773	756,8	8985	208
8	90	250	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15%Ar	673	709,9	9100	267
9	180	125	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	834,9	8945	181
10	150	50	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Ar	773	772,4	10235	179

Продовження таблиці 4.8

№ експ.	Час дифузійного насичення, хв.	Тиск реакційного газу, Па	Склад реакційного газу	Температура газу, °К	Експлуатаційна температура, °К	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	Товщина дифузійного шару, мкм
11	210	175	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	673	897,3	8144	312
12	150	100	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	873	803,6	8335	228
13	210	225	80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Аг	673	678,6	10835	267
14	180	150	95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈	773	866	8841	215
15	240	25	90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	873	741	9150	191
16	90	150	90% N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Аг	673	780	8659	212

При дослідженні процесу ПА ЕДН – покриттів були визначені параметри, які найбільше впливають на мікротвердість і зносостійкість ЕДН – покриттів [7, 36, 38]:

- час дифузійного насичення – 90 – 240 хв.;
- тиск реакційного газу – 25 – 250 Па;
- склад реакційного газу – 90%N₂+5%С₃Н₈+5%Ar; 95%N₂+5%С₃Н₈;
80%N₂+5%С₃Н₈+15%Ar;
- температура процесу дифузійного насичення – 673 – 873 °К;
- експлуатаційна температура – 678 – 867,3 °К (табл. 4.8).

4.5 Визначення характеристик ЕДН – покриттів для доцільності їх обробки ПА

Дослідження мікротопографії поверхонь шарів ЕДН – покриттів після ПА показало, що пористість покриттів негативно позначається на якості. Встановлено, що на шарах пористістю більше 7% (табл. 4.9, рис. 4.8 а) після ПА на поверхні зразків з'являються ділянки спучування (здуття) покриття розміром до 200 – 500 мкм. Після відшаровування ділянки спучування перетворюються в каверни. Очевидно, що чим більше розвинена пористість

шарів, тим сильніше виявляється ефект спучування. Проведені дослідження показують, що при щільності шарів більше 94% даний ефект не виникає.

Покриття, отримані ЕДН (розпилення повітрям) мають пористість більше 7% (рис.4.8 а, табл. 4.9), практично неможливо зміцнити азотуванням в імпульсному режимі без утворення дефектних ділянок, оскільки поверхня пор покрита тонким шаром оксидів заліза.

Режими 1 і 2 ЕДН (розпилення сумішшю пропану – повітря) дозволяють одержувати покриття з щільністю, яка наближається до щільності компактного матеріалу (рис.4.8, б, табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Результати досліджень топографії ЕДН – покриття після його обробки ПА при 780 °К

Метод наплення	Матеріал, що наплюється	Пористість покриття, %	Мікротопографія поверхні
ЕДН по режиму 4 (розпилення повітрям)	49X13 X18H10T	≈ 10 ≥ 8	відшарування відшарування
ЕДН по режимам 2 і 3 (розпилення сумішшю пропан – повітря)	40X13 X18H10T	≈ 6 ≈ 5	гладка поверхня без змін гладка поверхня без змін
ЕДН по режиму 4 (розпилення повітрям)	40X13 X18H10T	≈ 10 ≥ 8	відшарування відшарування
ЕДН по режимам 2 і 3 (розпилення сумішшю пропан-повітря)	40X13 X18H10T	≈ 6 ≈ 5	гладка поверхня без змін гладка поверхня без змін

При дослідженні процесу обробки відновлених поверхонь з напиленими покриттями азотуванням в імпульсному режимі було визначено, що при обробці покриттів з пористістю більше 8 % має місце їх відшарування (табл. 4.9) [13, 35].

ЕДН – покриття, отримані в результаті розпилення дротових матеріалів, за своєю будовою близькі до газотермічних порошкових покриттів. Однак, якщо при напленні порошоків окремі частинки можуть бути не проплавлені або нагріті тільки до передплавильних температур, то під час розпилення дротів шар формується тільки з розплавлених частинок

(інакше не відбудеться, відрив крапель від дроту). Це обумовлює більшу, ніж при використанні порошкових дротів деформацію частинок і меншу пористість (рис. 4.9).

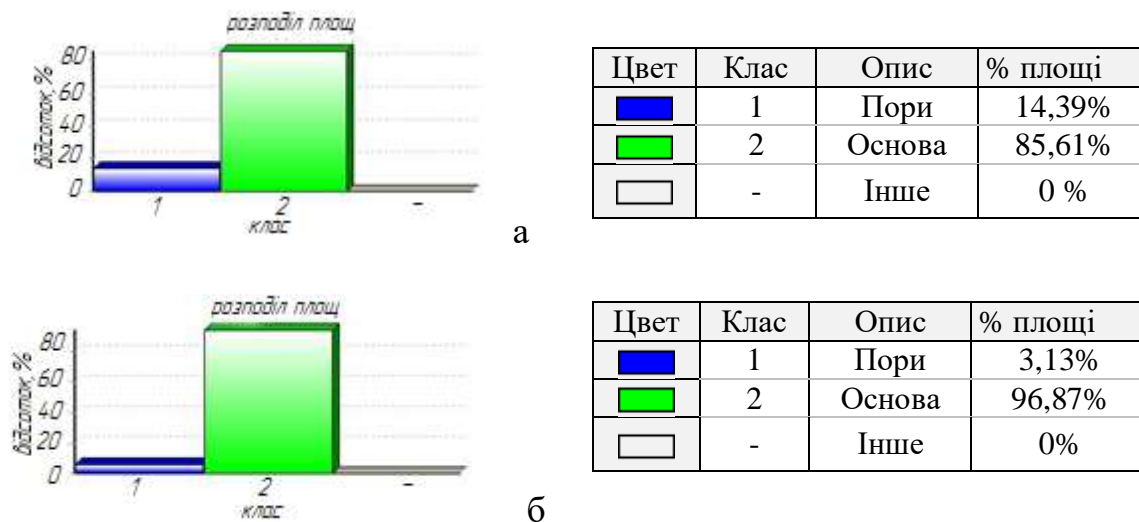
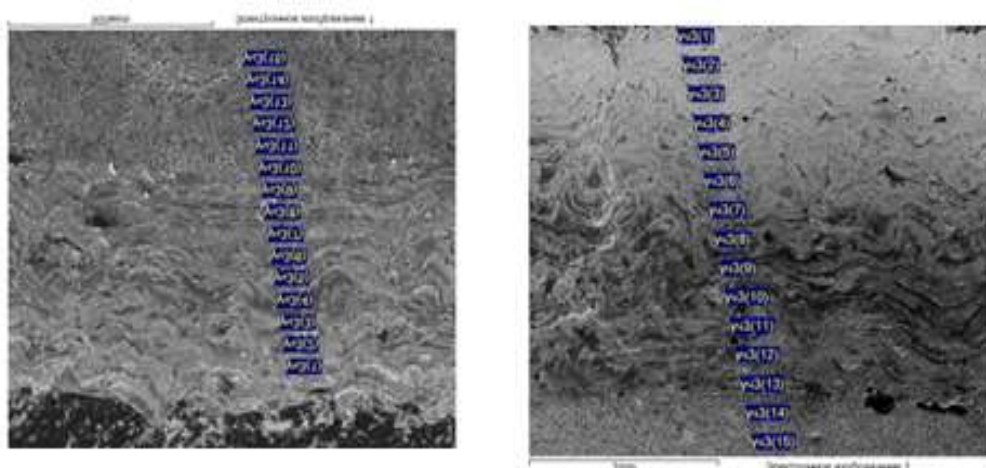


Рисунок 4.8 – Результати кількісного стереологічного аналізу пористості поверхні, відновленої ЕДН – покриттями при розпиленні матеріалу покриття повітрям (а) і продуктами згорання пропано – повітряної суміші (б)



а ×200

б ×200

Рисунок 4.9 – Мікроструктура ЕДН – покриттів зі сталі 40X13, отриманих розпиленням металу, розплавленого в електричній дузі, реактивної струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші при надлишку пропану (а) – режим 1 і повітря (б) – режим 2

Властивості ЕДН – покриттів залежать від характеристик фізико – хімічних взаємодій: повітряного потоку з розплавом дроту; перетворення кінетичної енергії руху розпиленних частинок в роботу деформації при їх механічному контакті з відновлюваною поверхнею, і передачею внутрішньої (теплової) енергії від частинок деталі. Формування покриття супроводжується інтенсивним впливом факела на частинки розпиленого матеріалу і їх взаємодією між собою в шарі на поверхні деталі.

Структурний стан і властивості напилених покриттів залежать від параметрів процесу ЕДН: витрат і тиску робочих газів, складу горючої суміші, дистанції напилювання і ін. Основний вплив на пористість покриттів надає дистанція напилення (табл. 4.10, рис. 4.10) і дисперсність розпилення (рис. 4.11).

Таблиця 4.9 – Міцність зчеплення ЕДН – покриттів з відновленою поверхнею в залежності від дистанції напилення

Пористість, % при нанесенні покриттів розпиленням		
Показник пористості	повітрям	продуктами сгорання пропано – повітряної суміші
Мінімальна	9,034	3,639
Максимальна	21,724	6,722
Середня	15,379	5,181

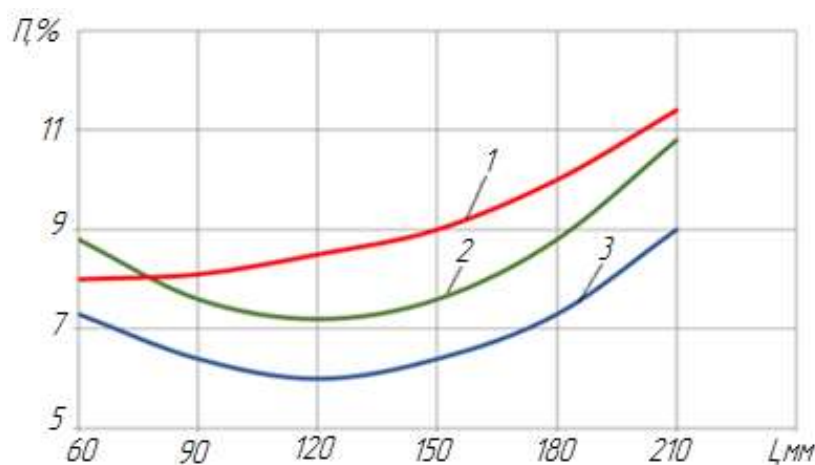


Рисунок 4.10 – Залежність пористості покриттів від дистанції напилення: 1 – сталь 40X13; 2 – 18Н10Т; 3 – Х20Н80

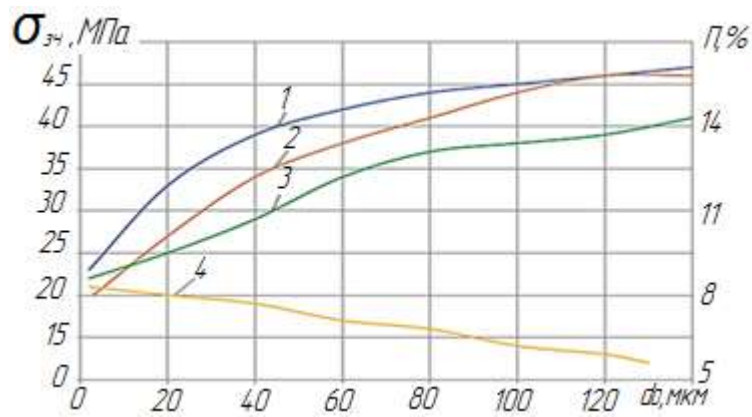


Рисунок 4.11 – Залежність пористості і міцності зчеплення покриттів від середнього розміру розпилюємих частинок дротів зі сталі 40 Х13 (1), 12Х18Н10Т, Х18Н10Т (2,3) і Х20Н80 (4)

Таким чином, азотувати доцільно відновлені поверхні з ЕДН – покриттями щільністю 92 – 94 % [13, 35]. На щільність покриттів впливає не тільки склад суміші, що розпилює (табл. 4.9), а і дистанція напылення (рис. 4.10, табл. 4.9) та дисперсність розпилення (рис. 4.11).

Підвищення твердості і зносостійкості поверхонь деталей з ЕДН покриттями при їх обробці ПА забезпечується за рахунок утворення твердих розчинів азоту (табл. 4.10, табл. 4.10) завдяки реалізації при імпульсному режимі азотування ефекту прискореної дифузії речовини, який отримав назву «аномальний масоперенос» [41].

Таблиця 4.10 – Структурні параметри модифікованих покриттів з сталей мартенситного класу

Режим обробки		Товщина шару, мкм	Фазовий склад
ЕДН повітрям	N ⁺ 620 К	5 – 10	α – Fe, γ – Fe, γ _N , Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N
	N ⁺ 670 К	10 – 20	α – Fe, γ – Fe, γ' _N , Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N, α'' – (Fe,Cr) ₈ N и γ' – Fe ₄ N
	N ⁺ 720 К	15 – 25	α – Fe, Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N, γ' – Fe ₄ N,
	N ⁺ 770 К	25 – 30	α – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' – Fe ₄ N, CrN
ЕДН повітрям і пропаном	N ⁺ 620 К	5 – 10	α – Fe, γ – Fe, γ _N , Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N
	N ⁺ 670 К	10 – 15	α – Fe, Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N, γ' – Fe ₄ N
	N ⁺ 720 К	15 – 20	α – Fe, Fe ₃ O ₄ , ε – (Fe,Cr) ₃ N, γ' – Fe ₄ N,
	N ⁺ 770 К	25 – 30	α – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' – Fe ₄ N, CrN

Обробка азотуванням в імпульсному режимі ЕДН – покриттів із сталей аустенітного класу призводить до утворення модифікованих шарів товщиною від 3 – 5 до 15 – 25 мкм (табл. 4.11). Причиною глибини азотування ЕДН – покриттів до 15 – 30 мкм є наявність великої кількості оксидних плівок в покритті, які є бар'єром для ПА (рис. 4.12, рис. 4.13). Оксиди утворюються в процесі ЕДН під час польоту розплавлених частинок і в процесі їх кристалізації на поверхні деталі. Усунути оксидні плівки можливо при розпилюванні металу, розплавленого в електричній дузі, реактивним струменем продуктів згоряння пропано – повітряної суміші при надлишку пропану (відновна атмосфера) або надлишку повітря (окислювальна атмосфера) по режимам 1 і 2.

Таблиця 4.11 – Структурні параметри модифікованих покриттів із сталей аустенітного класу

Режим обробки		Товщина шару, мкм	Фазовий склад
ЕДН повітрям	N ⁺ 620 К	3 – 5	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ _N
	N ⁺ 670 К	5 – 10	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' _N
	N ⁺ 720 К	10 – 15	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' _N , γ' – Fe ₄ N, CrN
	N ⁺ 770 К	15 – 20	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' – Fe ₄ N, CrN
ЕДН повітрям і пропаном	N ⁺ 620 К	3 – 5	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ _N ,
	N ⁺ 670 К	3 – 5	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' _N ,
	N ⁺ 720 К	10 – 15	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' _N , γ' – Fe ₄ N, CrN
	N ⁺ 770 К	15	α – Fe, γ – Fe, Fe ₃ O ₄ , γ' – Fe ₄ N, CrN

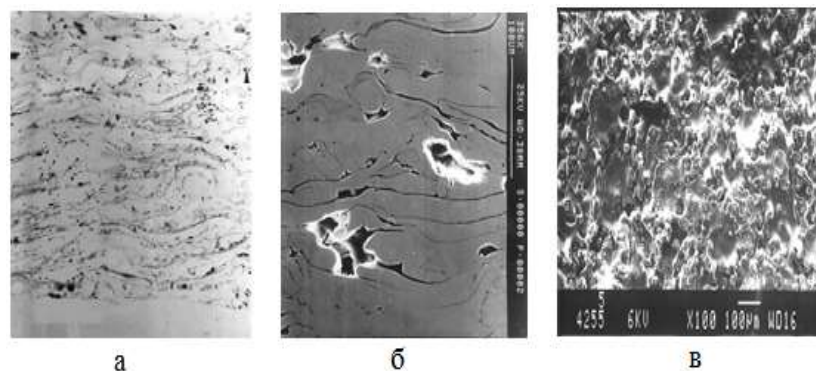


Рисунок 4.12 – Мікроструктура (а, б) і мікротопографія (в) покриття зі сталі X18H10T

Таким чином, ЕДН – покриття утворюється шляхом розплавлення дроту і формування частинок в умовах їх інтенсивної взаємодії з розпорошувати факелом, а також подальшого укладання розплавлених крапель в шар (рис. 4.12, рис. 4.13). Частинки, що напилюються, утворюються в результаті взаємодії повітряного струменя з рідким металом і піддаються окисленню, в результаті чого до моменту зіткнення з поверхнею основи на частинках формується окисна плівка. На мікрошліф оксиди видно у вигляді довгастих темних або сірих ділянок, а пори – чорних (рис. 4.12, 4.13).

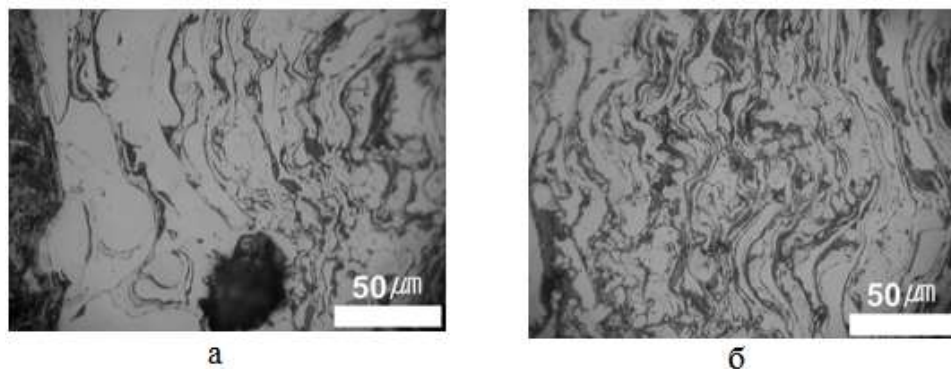


Рисунок 4.13 – Мікроструктура ЕДН – покриттів зі сталі 40X13, отриманих розпиленням металу, розплавленого в електричній дузі, повітрям (а) – режим 3 і реактивної струменем продуктів згоряння пропано – повітряної суміші при надлишку повітря (б) - режим 2

Наявність оксидних плівок в напиленому покритті – бар'єр для реалізації процесу азотування в імпульсному режимі, 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 з відшаруванням покриття. 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 азотування має місце в напилених покриттях при зниженні вмісту оксидних плівок. Виключити

утворення плівок оксидів можливо при розпилені сталевих дротів продуктами згорання пропану і повітря по режимам 2 і 3 (табл. 4.3).

4.6 Моделювання дифузійних процесів при ПА напилених покриттів і їх залежність від пористості

Підвищення функціональних властивостей і терміну служби відновлених поверхонь деталей ЗТ вимагає рішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів при відновленні поверхонь КЕ деталей ЗТ [41].

Для вирішення проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів 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 напилених шарах покриття [444 – 446, 464 – 484]. На основі проведеного аналізу запропонована постановка задачі управління дифузним насиченням пористих напилених покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування [41].

Широке впровадження даного ефекту потребує вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах на відновлених поверхнях в процесі їх обробки азотуванням в імпульсному режимі [32].

Ефект прискореної дифузії речовини, що отримав назву «аномальний масоперенос», реалізується при ПА. Широке впровадження даного ефекту призводить до необхідності управління цим явищем - вибором параметрів зовнішніх впливів, які зможуть сформувати покриття із заданим комплексом властивостей [41]. Для вирішення даної проблеми були використані підходи термодинаміки - дифузійної теорії пружності Я.С. Підстригача і локально-нерівноважної термодинаміки Я.Й. Бурака. До факторів, які впливають на швидкість масопереносу, відносяться [41]: температура, параметри зовнішніх

силових впливів, структурно – фазовий стан матеріалу в початковий момент часу. При цьому швидкість деформації є одним з визначальних фактором, а коефіцієнт дифузії в середовищі залежить від швидкості деформації і має вигляд [41]:

$$D_M = D_0 + C|\dot{\varepsilon}|^\alpha \times \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (4.8)$$

де D_0 - коефіцієнт дифузії в разі відсутності деформацій, $\dot{\varepsilon}$ - швидкість деформацій, α, β - константи, T - температура

При проходженні дифузних процесів в пористих напилених покриттях коефіцієнт дифузії істотно залежить від структури покриття, яка може здаватися довільним кількістю змінних. У зв'язку з цим представимо коефіцієнт дифузії пористих напилених покриттів, який залежить від параметрів зовнішніх енергетичних впливів і від характеристик пористості, у вигляді залежності [41]:

$$D_M = D_M \times \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots} \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \quad (4.9)$$

де D_M - коефіцієнт масопереносу, Π_k^i - параметри енергетичних впливів під час технологічної модифікації, θ_j - змінні, що описують пористість покриття; i, j, k - індекси, що біжать

Оскільки в загальному випадку встановлення залежностей типу (4.8) на даний момент є відкритою проблемою, тому було запропоновано наступне уявлення коефіцієнта масопереносу у вигляді лінійного адитивного розкладання в ряд по основним змінним [41]:

$$D_M = D_M \sum_{i,k} C_{i,k} \Pi_k^i + \sum_j A_j \theta_j \quad (4.10)$$

де $C_{i,k}, A_j$ - емпіричні коефіцієнти

При постановці завдання управління дифузним насиченням напилених шарів важливим є вибір критерію (функціоналу), згідно з яким буде прийнято встановлення оптимального рішення. У даній роботі [41] в якості критерію оптимальності пропонується глибина насичення шару, отриманого в результаті технологічної модифікації

$$L \rightarrow \max \quad (4.11)$$

З урахуванням залежності функціонала (4.10) від параметрів пористості покриття і зовнішніх енергетичних впливів отримаємо залежність (4.11) у вигляді [41]:

$$L = L \times \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots}, \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \quad (4.12)$$

Таким чином, завдання управління дифузним насиченням напилених шарів в умовах ПА зводиться до виразу, який буде мати вигляд [41]:

$$\begin{cases} \Pi_k^i \\ L = L \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots}, \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \end{cases} \rightarrow \max \quad (4.13)$$

Рішення завдання можна проводити за допомогою розкладу функціоналу (4.12) в системі базисних функцій за допомогою методу Гальоркіна або за допомогою численних наближень з використанням методу градієнтного спуску на основі модельних або розширених уявлень.

Таким чином, побудовані математичні співвідношення дозволяють проводити управління дифузним насиченням ЕДН – покриттів в умовах ПА для підвищення експлуатаційних характеристик деталей ЗТ.

4.7 Висновки до розділу 4

1. Аналіз методів, що застосовуються для обробки поверхонь перед ЕДН показав, що метод ЕІЛ забезпечує найвищу міцність зчеплення напиленого покриття з відновлюваною поверхнею. При ЕІЛ хороше зчеплення між покриттям і відновлюваною поверхнею забезпечувалося за рахунок підвищення шорсткості (рекомендована шорсткість поверхні R_a перед ЕДН становить 63 – 120 мкм). Доцільність вибору ЕІЛ як метода обробки поверхні перед напиленням обґрунтована такими економічними показниками як витратами електроенергії і вартістю обладнання.

Нанесення підшару з ніхрому (X20H80), молібдену або нікелю ЕІЛ позитивно впливає на адгезійну міцність напилених покриттів

Отримані залежності і результати експериментальних досліджень ЕДН були спрямовані на вирішення завдання управління параметрами газотермічного потоку: швидкістю і температурою газу і частинок, гранулометричним складом часток, властивостями частинок і несучого середовища з метою отримання високих фізико – механічних і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь і терміну служби деталей ЗТ.

2. Управління факторами, які стосуються дротяних матеріалів, що напилюються, зокрема діаметром, хімічним складом і швидкістю подачі дротів, можна підвищити якість і термін служби відновлюваних поверхонь. Оптимальний діапазон діаметрів – 1,2 – 1,8 мм.

3. Встановлено, що збільшення швидкості і температури струменя транспортуемого газу і частинок при ЕДН дозволяє зменшити діаметр розпилюємих крапель і тим самим підвищити щільність і знизити окисність відновлених поверхонь, що забезпечить їх максимальну якість.

4. Визначено, що одним з важливих технологічних параметрів при відновленні поверхонь деталей ЗТ ЕДН – покриттями є дистанція напилення. Оптимальний діапазон дистанції напилення 80 – 150 мм. Розподіл частинок

металу, що напилюється за розмірами залежить від режиму напилення і виду металу, що напилюється.

5. Встановлено, що при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0 - 1,1$ і при дистанції напилення – 80 – 150 мм швидкість потоку при ЕДН забезпечує ефективне диспергування крапель розплавленого матеріалу покриття і підвищення його щільності.

Обґрунтовано, що на щільність покриття мають вплив температура і дисперсність розпилення. 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.

6. 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.

Отримані залежності дозволяють прогнозувати параметри ЕДН та дають можливість аналітично оцінити їх вплив на якість відновлюваної поверхні.

При ЕДН відбувається зниження кількості вуглецю і вигорання легуючих елементів в покритті, що призводить до зниження їх мікротвердості, що негативно позначається на твердості, зносостійкості, експлуатаційних характеристик і терміну служби відновлюваних деталей. Істотно підвищити ці властивості можна за допомогою ПА.

7. Досліджено, що азотувати доцільно відновлені поверхні з ЕДН-покриттями щільністю 92 – 94 %. Встановлено, що на шарах пористістю більше 7% після ПА на поверхні зразків з'являються ділянки спучування (здуття) покриття розміром до 200 – 500 мкм. На щільність напилених покриттів впливає не тільки склад суміші, що розпилює, а і дистанція напилення і дисперсність розпилення.

Структурний стан і властивості напилених покриттів залежать від параметрів процесу ЕДН: витрат і тиску робочих газів, складу горючої суміші, дистанції напилювання і ін. Основний вплив на пористість покриттів надає дистанція напилення і дисперсність розпилення (рис. 4.11).

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».

Обробка азотуванням в імпульсному режимі ЕДН – покриттів із сталей аустенітного класу призводить до утворення модифікованих шарів товщиною від 3 – 5 до 15 – 25 мкм. Причиною глибини азотування ЕДН – покриттів до 15 – 30 мкм є наявність великої кількості оксидних плівок в покритті, які є бар'єром для процесу ПА. Усунути оксидні плівки можливо при розпиленні металу реактивним струменем продуктів згоряння пропано – повітряної суміші при надлишку пропану або надлишку повітря по режимам 1 і 2.

8. Показано, що при ПА ЕДН-покриттів реалізується ефект прискореної дифузії речовини, що отримав назву «аномальний масоперенос». Впровадження комбінованого методу відновлення призводить до необхідності управління цим явищем - вибором параметрів зовнішніх впливів, які зможуть сформувати покриття із заданим комплексом властивостей і вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів при їх обробці ПА.

Побудовані математичні співвідношення дозволяють проводити управління дифузним насиченням ЕДН-покриттів в умовах ПА для підвищення експлуатаційних характеристик деталей ЗТ.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 25, 32 – 36, 38, 41, 43, 48].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ НА КОМПЛЕКС ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ

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.

5.1 Дослідження і розрахунково – експериментальне визначення міцностної характеристики (адгезійної міцності) відновлених деталей і її залежності від параметрів комбінованого способу відновлення

Дослідження механічних властивостей системи «відновлена поверхня – покриття» є одним з найбільш важливих етапів при відновленні деталей ЗТ, який дозволяє об'єктивно судити про їх механічну поведінку при експлуатації, управляти їх міцністю шляхом дії на склад, структуру, властивості і технологію отримання покриттів.

Зберегти зв'язок відновленої поверхні деталі з покриттям можливо тільки при наявності високої адгезійної міцності. З метою визначення величини адгезії необхідно дослідити і визначити залежність між міцністю зчеплення, критичною деформацією основи ($\varepsilon_{кр.}$) і основними конструкційно – технологічними параметрами покриття [444 – 446].

Міцність зчеплення в теорії, технології та практики захисних покриттів, безперечно, визнана проблемою номер один [444]. Незалежно від сфери застосування системи «покриття – відновлювана поверхня», міцність зчеплення є основним чинником, що визначає її придатність [444 – 446].

Міцність зчеплення приймається в якості основного параметра оптимізації технологічних процесів нанесення покриття [446].

Міцність зчеплення покриття з основою (адгезійна міцність) - умовне напруження, що відповідає найбільшому навантаженню, яке попереджає відділенню покриття від відновлюваної поверхні [442].

На міцність зчеплення ($\sigma_{зч.}$) особливо впливає узгодження коефіцієнтів лінійного розширення (КРЛ) матеріалів, що сполучаються причини виникнення залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$) [444 – 469]. Збільшення залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$) може привести до розтріскування і відшарування покриття. Зниження залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$) збільшує міцність зчеплення ($\sigma_{зч.}$).

Адгезія покриття - створення атомарного або молекулярного зв'язку поміж основою і частинками покриття під час його нанесення. На зниження адгезії впливають залишкові напруження ($\sigma_{зал.}$). Збільшення $\sigma_{зал.}$ може привести до розтріскування і відшарування покриття [469 – 473]. З експерименту отримують інтегральну характеристику реальної адгезії і залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$) (міцність утримання покриття на основі або технічна адгезія) [469 – 473]. Якби вдалося повністю виключити вплив на реальну адгезію залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$), то її показники були б занижені за рахунок впливу концентраторів напружень [469 – 473].

Адгезійна міцність системи характеризується максимальними дотичними напруженнями на межі відновлена поверхня-покриття, а також максимальними нормальними напруженнями в покритті, які були досягнуті на момент реєстрації процесу руйнування композиції (когезійна міцність покриттів) [469]. Кінетика росту адгезійної міцності і кінетика збільшення площі контакту пов'язані між собою нелінійною залежністю, причому адгезійна міцність в значній мірі залежить від швидкості її зростання. У свою чергу з'єднання матеріалів покриття і відновлюваної поверхні в зоні контакту обумовлено контактними явищами на межі їх розділу.

Визначена експериментально адгезійна міцність – це частина міцності утримання або ще менша частина реальної адгезійної міцності. Рівень напружень в покритті (визначається сумою залишкових, термопружних та напружень, що викликані зовнішніми навантаженнями) має значний вплив на його захисні властивості.

Зростання адгезійної міцності підвищує захисні властивості і надійність покриття. Адгезійна міцність розглядається як основа теорії зносу і визначає зносостійкість [442 – 445]. Сформувався новий науковий напрям - адгезійна механіка.

Адгезійна і когезійна міцність – це основні характеристики складових частин композиції «деталь – покриття», співвідношення між якими багато в чому визначає працездатність композиції [442].

Когезійна міцність характеризує міцність самого покриття, а адгезійна – міцність покриття з поверхнею деталі) [442].

Міцність покриття (H_d когезійна міцність) – умовна напруга, що відповідає найбільшому навантаженню, яке передує руйнуванню зв'язків між частками покриття і (чи) самого матеріалу часток [443, 444]. Існує думка [442], що адгезія - поняття, що має більшу спільність, ніж когезія, тобто ніж міцність твердих монолітних тіл. Когезійну міцність можна віднести до приватного і найпростішого випадку адгезійної міцності.

Руйнуванню матеріалу деталі передує когезійне руйнування покриття з одночасним або більш раннім руйнуванням адгезійного зв'язку – відшаровуванням. Втрата властивостей покриття обумовлюється його розтріскуванням і відшаровуванням. Зберегти зв'язок деталі з покриттям можливо тільки за наявності високої адгезійної міцності. З метою пояснення високих значень адгезії і підтвердження їх значень необхідно досліджувати і визначити залежність між міцністю зчеплення, критичною деформацією основи $\epsilon_{кр}$ і основними конструкційно – технологічними параметрами. Деформативність, тобто найбільша спільна деформація системи $\epsilon_{кр}$, при якій ще не відбувається відшаровування або розтріскування покриттів,

зменшується зі збільшенням товщини покриттів, при цьому залежність $\varepsilon_{кр} = f_{кр}(\delta)$ носить пороговий характер. При великій товщині покриття має деформативність вище $\varepsilon_{кр}$, чим покриття отримане при меншій товщині ($\varepsilon_{кр} \approx 0,6 \%$).

Адгезійна міцність τ_a і когезійна σ_k розраховуються по деформації основи у момент відшаровування або розтріскування покриття.

Адгезійна і когезійна міцності – характеристики взаємопов'язані і на підставі інформації про одну з них неможливо судити про рівномірність композиції «основа – покриття» в цілому. Тому необхідність їх визначення виникає як на етапі розробки способу відновлення шляхом нанесення покриттів, так і при контролі якості відновленої поверхні деталі. Різниця полягає лише в тому, що в першому випадку адгезійна і когезійна міцності є параметрами оптимізації, а в другому – параметрами контролю [443 – 446].

Для створення науково – обґрунтованих підходів вибору оптимальних параметрів комбінованого способу відновлення деталей ЗТ по критеріям адгезійної міцності була зроблена спроба проаналізувати стан існуючих теоретичних підходів оцінки адгезійної міцності, вживаних в дослідженні різних видів адгезійних з'єднань. В результаті цього аналізу припускаємо оцінити можливість застосування існуючих гіпотез і теорій адгезії для вирішення проблем міцності матеріалів з покриттями як в умовах формування покриття, так і в умовах їх експлуатації.

5.1.1 Аналіз стану існуючих теоретичних підходів оцінки адгезійної міцності. Застосування існуючих гіпотез і теорій адгезії для вирішення проблем надійності ЗТ та їх елементів

У технічній літературі адгезія трактується як виникнення зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних тіл, приведених в зіткнення [40, 453]. Такі тіла прийнято називати: адгезив – покриття і субстрат – основа. Як стверджують автори робіт [40, 48, 453], слід розрізняти адгезію частинок, покриттів і рідини. При нанесенні покриттів, наприклад, газотермічними

методами напилення і іншими методами має місце адгезійна взаємодія частинок матеріалу субстрату з матеріалом адгезиву. Адгезійна взаємодія між адгезивом і субстратом, що веде до міцного зв'язку [40, 453], характеризується явищами, які знаходять своє відображення у ряді гіпотез, теорій і моделей, що відносяться до областей механіки і фізичної хімії.

Існуючі гіпотези: енергетична, рекристалізаційна, дислокаційна, окисна, дендритна, електролітна, плівкова, гіпотеза «механічної» адгезії тощо, [40, 48 453] не мають сили прогнозу, вони залишаються дискусійними. Гіпотези, запропоновані для пояснення зчеплення металів, досить суперечливі, не дають залежності здатності до зчеплення від фізико – хімічних властивостей компонентів.

Гіпотеза рекристалізації [444, 453] пояснює зчеплення спільною рекристалізацією зерен на межі розділу шарів. Проте когерентне сполучення компонентів по поверхні їх розділу маловірогідне, металографічний аналіз спростовує цю гіпотезу, вона не пояснює багатьох явищ.

Енергетична гіпотеза заснована на активуванні зчеплення пластичною деформацією [40, 48 453]. Розвиток її привів до дислокаційної гіпотези зчеплення [40, 48, 453], згідно якої адгезійний зв'язок викликаний рухом дислокаційних меж окремих контактів до утворення зв'язків на усій площі контакту.

Проте обидві ці гіпотези, і рекристалізаційна гіпотеза і енергетична гіпотеза не можуть пояснити, від яких фізико – хімічних властивостей матеріалів залежить адгезійна міцність [40, 48, 453].

Для зчеплення металів запропонована плівкова гіпотеза [40, 48, 453], згідно якої зчеплення визначається властивостями плівок оксидів і адсорбованих речовин. Відмічають незначний вплив на адгезію чистих металів фізично адсорбованого газу і значніший вплив хімічно адсорбованого. Багато експериментів спростовують і цю гіпотезу [40, 453].

Для пояснення процесів адгезії, як результату заклинювання матеріалу покриття в мікродефектах поверхні основи, була запропонована гіпотеза

«механічної» адгезії [40, 453]. Механічний зв'язок - це супутня, але не основна причина утворення міцного з'єднання різнорідних матеріалів. Відмічають «механічну» адгезію, залежну від шорсткості і пористості контактних поверхонь [40, 453]. Обмеженість уявлень про адгезійну взаємодію з позицій «механічних» зв'язків очевидна.

Необхідно помітити, що сучасне трактування «механічної» теорії адгезії не повністю унеможливорює взаємодію компонентів за рахунок фізичних і хімічних процесів. Проте їх долю вважають несуттєвою і тому їх не враховують.

В області покриттів ставилося завдання розробити узагальнену теорію адгезії [40, 48, 453]. Питання адгезійної міцності зачіпають покриття, клейові і паяні з'єднання, біметали, композитні матеріали з металевою, полімерною і кристалічною матрицею. Для кожного виду властиві певні теорії адгезії, методи експериментального дослідження і прилади. Цим теоріям і методам властиві загальні і специфічні достоїнства і недоліки. Проте вузька постановка досліджень перешкоджає використанню і усуненню недоліків у вивченні різних видів адгезійних з'єднань.

Проте із – за вибірковості властивостей покриттів, індивідуальності їх захисної дії, надзвичайної різноманітності природи покриттів – створення єдиної теорії адгезії неможливе [40, 48, 453]. Може йтися лише про деякі, відносно загальні принципи і теоретичні передумови [40, 453].

До теорій, що пояснюють причину адгезійної міцності, відноситься релаксаційна, яка розглядає процеси деформації, виникнення внутрішньої напруги і релаксацію при відриві покриттів.

Електрохімічна теорія зчеплення з металом покриттів пояснює адгезійний зв'язок нерівномірним розчиненням поверхні електрохімічною корозією і збільшенням механічної складової адгезії [40, 453].

Для напилених покриттів вирішальною являється стадія хімічної взаємодії. Міцне зчеплення виникає в результаті хімічної взаємодії окремих компонентів, що входять до складу дотичних фаз [40, 453].

Теорії, які визначають величину адгезії залежно від природи і числа зв'язків, що доводяться на одиницю площі, знаходять відображення в дифузійних теоріях [40, 453]. Роль дифузійних процесів в утворенні адгезійного зв'язку покриттів дуже велика [40, 453]. Вважається, що дифузія один з ефективних способів досягнення молекулярного контакту між компонентами. Вплив термообробки на міцність зчеплення різних матеріалів свідчить про роль дифузійних процесів і перехідних шарів. Дифузійна теорія розглядає адгезію як об'ємне явище, а не поверхнєве [40, 453].

Існуючі теорії приводять лише міркування, взаємодії, що роблять один характер, що обумовлює адгезію, вірогіднішим в порівнянні з іншим [40, 453]. Існуючі теорії і гіпотези адгезії не суперечать, а тільки доповнюють одна іншу. Для застосування будь – якої теорії адгезії в кожному випадку потрібний конкретний аналіз адгезійних явищ [40, 453]. Теорії, запропоновані для пояснення зчеплення металів не дають залежності здатності до зчеплення від фізико – хімічних властивостей компонентів.

5.1.2 Фізичні основи міцності зчеплення

Питання про фізичні основи міцності зчеплення, як і стан теорії адгезії, дуже складене і суперечливе [453]. Зчеплення в адгезійному контакті в різних випадках пояснюється молекулярною, дифузійною, донорно – акцепторною, механічною взаємодією, а також зміною енергетичного і структурного стану матеріалу покриття і матеріалу основи. Можна погодитися з думкою ряду дослідників [444, 453], що міцність зчеплення обумовлена сумарною дією перерахованих чинників. При цьому вплив кожного з цих чинників на міцність зчеплення змінюється залежно від природи матеріалу основи і покриття, їх властивостей і параметрів процесу нанесення покриття.

Аналіз гіпотез і теорій адгезії [444, 453] підтверджує достовірність дифузійної теорії адгезійної міцності. Дифузійна теорія адгезії широко застосовується у комбінованих способах нанесення багатофункціональних покриттів. У практиці комбінованих способів отримання

багатофункціональних покриттів найбільш поширена і затребувана дифузійна теорія адгезії, що реалізується при різних видах ТО, МТО і ХТО обробки ГТН – покриттів.

Переваги дифузійної теорії адгезії полягає в її технологічній гнучкості при регулюванні дифузійної рухливості різними добавками [444, 453]. Підвищення функціональних властивостей і терміну служби багатофункціональних покриттів КЕ деталей ЗТ вимагає вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів, отриманих в результаті ЕДН [444, 445, 453]. Для вирішення проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів проведений аналіз моделей механіки, які описують взаємозв'язані процеси силової, термічної і дифузійної природи, а також фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в напилених шарах покриття. На основі проведеного аналізу запропонована постановка завдання управління дифузним насиченням пористих напилених покриттів в умовах ТЦ ІА [41]. Ефект прискореної дифузії речовини, що дістав назву «аномальний масоперенос», реалізується при ТЦ ІА [41]. Широке впровадження цього ефекту призводить до необхідності управління цим явищем – вибором параметрів зовнішніх дій, які зможуть сформувати покриття із заданим комплексом властивостей. Як ми бачимо, розглянуті теорії адгезійної міцності відбивають якусь одну сторону процесу адгезії. В той же час, доцільно було б мати єдиний підхід до з'ясування причин адгезії, а існуючі теорії адгезії представляти, як приватні вирази єдиного підходу. Засадничим в цьому сенсі ймовірно може бути рівняння, приведене А.Д. Зимоном [453]:

$$W = \bar{W} \times N \quad (5.1)$$

де W – середня енергія зв'язку; N – число зв'язків на одиницю площі

Вирішувати приватні завдання збільшення адгезійної міцності можливо використовуючи термодинамічний аналіз, що розвивається в трьох напрямках.

Перше базується на підходах класичної термодинаміки Гіббса і пов'язане з розрахунками кінцевих рівноважних продуктів реакції між компонентами. Розвиток цих робіт дав можливість виконувати їх для складніших систем, наприклад, «хімічна сполука – багатокомпонентний твердий розчин».

Другий напрям ґрунтується на підходах термодинаміки малих дисперсних систем Хілла і пов'язаний з розрахунками метастабільних станів.

Третій напрям, що розвивається З.Б. Федоровим і М.Х. Шоршоровим [40, 453], пов'язаний з аналізом термодинамічних умов диспергування речовин при агрегатних фазових перетвореннях і хімічних реакціях типу синтезу з'єднань або ж навпаки термічного розкладання. Відповідно до теорії Ю.Л. Красуліна, виникнення міцних адгезійних зв'язків між компонентами обумовлене оптимальною тривалістю контактування фаз [40, 453]. При цьому слід розглядати два випадки контактування: в контакті знаходяться тверда і рідка фаза; в контакті знаходяться дві тверді фази. У першому випадку, оптимальний час контактування t_k має бути:

$$t_{ад} < t_k \leq t_p + t_d + t_z \quad (5.2)$$

де $t_{ад}$ – тривалість, необхідна для виникнення міцних адгезійних зв'язків по усій поверхні контакту; t_p – тривалість ретардації (інкубаційного періоду гетеродифузії); t_d – тривалість дифузії на глибину; t_z – тривалість утворення проміжної зародкової фази

В.Л. Красуліним [40, 453] виведена також формула для визначення часу ретардації запізнювання дифузії:

$$t_p = t_0 \exp \left[\frac{e \times (E_t - E_p)}{\lambda RT} \right] \quad (5.3)$$

де t_0 – постійна часу, обернено пропорційна до частоти власних коливань атомів; E_t, E_p – енергія активації дифузії відповідно до твердої і рідкої фаз

У разі розчинення твердої речовини в рідкому, можна користуватися теорією Б.А. Дарташкина, І.П. Добровольського і М.Х. Шоршорова [40, 453], у якій передбачена рухливість межі розділу. Нині ця теорія вдосконалена І.П. Гуровим [40, 453] стосовно трикомпонентних систем з діаграмами стану різного типу. У другому випадку, коли в контакті знаходяться два тверді тіла, визначення t_k зводиться до аналізу тривалості процесу утворення міцного з'єднання по усій поверхні контакту [40, 453]:

$$t_{ад} = t_{\phi} + t_a + t_{ов} \quad (5.4)$$

де t_{ϕ} – зближення атомів за рахунок пластичної деформації і утворення фізичного контакту відбувається із – за деформації мікрориступів на поверхні основи; $t_{ов}$ - тривалість об'ємної взаємодії, при якій відбувається гетеродифузія, рекристалізація тощо; t_a - тривалість активації контактних поверхонь, на яких відбувається утворення хімічних зв'язків [40]:

$$\frac{dN(f)}{dt} = [N_{\phi}(t) - N(t)] \times \exp - \frac{E_a}{RT} \times \exp \frac{S}{R} \quad (5.5)$$

де N - число атомів контактних поверхонь, що вступають в хімічний зв'язок; N_{ϕ} - число атомів, що вступають у фізичний контакт; E_a - енергія активації процесу; S – ентропія активації

Для аналізу зростання міцності $\varepsilon(t)$, окремий випадок загального рівняння для фіксованого числа центрів Z_0 має вигляд [40]:

$$\frac{G(f)}{G_m} = \frac{N(f)}{N_0} = 1 - \exp \times (Kt^n) \quad (5.6)$$

де K - константа швидкості реакцій

$$K = Z_0 \times K_\phi \times K_z \times K_p \quad (5.7)$$

де K_ϕ , K_z , K_p - відповідно константи швидкості утворення фізичного контакту і зародження центрів з міцним зв'язком і їх зростання; t - час процесу; n - показник міри, який характеризує порядок хімічної реакції; G_m - максимально можлива швидкість реакції

Аналіз адгезійних зв'язків з позицій термодинаміки показує, що адгезію не можна ототожнювати з адгезійною міцністю. Для порушення адгезії необхідно прикласти зовнішню силу ($F_{\text{відр.}}$) певної величини. Під дією сили межа розділу фаз переміститься на деяку відстань « l ». Помноження сили відриву на відстань « l » складає роботу відриву. При цьому робота і сила відриву не дорівнюватимуть роботі і силі адгезії. Вказана невідповідність обумовлена специфікою контактних явищ на межі «адгезив – субстрат», а також їх власними фізико – механічними властивостями. Позначивши, відповідно, $W_{\text{ад}}$ і $F_{\text{ад}}$ - роботою і силою адгезії, можна записати умову [40]

$$W_{\text{відр.}} = W_{\text{ад}} + W_{\text{д}} + W_{\text{е}} + W_{\text{п}} - W_{\text{ВН}} \quad (5.8)$$

і аналогічно

$$F_{\text{відр.}} = F_{\text{ад}} + F_{\text{г}} + F_{\text{е}} + F_{\text{п}} - F_{\text{ВН}} \quad (5.9)$$

де $W_{\text{ад}}$ – робота на подолання сил адгезії; $F_{\text{ад}}$ - сила, необхідна для подолання адгезії; $W_{\text{д}}$ – робота, що йде на деформацію (вигин) покриття; $F_{\text{д}}$ – сила, потрібна для вигину покриття; $W_{\text{е}}$ – робота на подолання

електричної взаємодії; F_e – сила на подолання електричної взаємодії; W_n – робота на деформацію мікронерівностей та ін. втрати; F_n – сила на деформацію мікронерівностей; $W_{ВН}$ – робота, що полегшує відрив покриття за рахунок внутрішніх напружень; $F_{ВН}$ – сила, зменшена на величину внутрішнього напруження покриття

З приведених співвідношень видно, що робота і сила відриву, як правило, більше роботи і сили адгезії. Відмітимо, що величина роботи і сила відриву використовується для оцінки працездатності матеріалів з покриттями, проте у більшості випадків, розробка і застосування як теоретичних, так і експериментальних методів оцінки вказаних параметрів викликає певні труднощі. Таким чином, розглянута історія розвитку теоретичних моделей для опису адгезії, пов'язані з нею механічні явища, основи термодинаміки процесів, що відбуваються на межі розділу фаз при адгезії, роль міжмолекулярних взаємодій і їх особливості при адгезії.

Запропоновані теоретичні основи міжфазного шару [40, 444, 453]. Приведений опис математичної моделі, який включає формальну математичну постановку проблеми, формулювання визначальних фізичних рівнянь, аналітичні оцінки властивостей міжфазного шару, оцінки впливу властивостей міжфазного шару на ефективні характеристики композиту. Більшість моделей описують міжфазну зону як об'ємний матеріал, а не поверхню розділу [40, 453]. Запропонований також варіант континуальної теорії моделей середовищ, що дозволяє врахувати масштабні ефекти, пов'язані з адгезійними взаємодіями [40, 453]. Досліджували поверхневе перемішування в процесі осадження плівки за допомогою тривимірного молекулярно – динамічного моделювання [40]. Межі розділу гетероструктур вивчають методами молекулярної динаміки [40, 453]. Різноманіття явищ, що відбуваються на межі розділу фаз і описуються теорією активованого комплексу, знайшло відображення у ряді теорій, що часом суперечливо трактують адгезійний зв'язок [453]. Встановлено, що за рахунок різних явищ і процесів – механічного зачеплення, фізичної адгезії, хімічного зв'язку, сил

усадки, металургійної взаємодії, дифузії відбувається утворення адгезійного з'єднання [40].

Так, при утворенні адгезійного з'єднання розрізняють первинні і вторинні явища і процеси [40, 453]:

– первинні процеси – виникнення молекулярного або хімічного зв'язку (іонною, ковалентною, механічною). Первинні процеси характеризуються явищем змочування [40, 444, 453]. Використовують також положення теорії капілярності.

– вторинні процеси - хімічні і електрохімічні реакції, розчинення, дифузія. Вторинні процеси розпочинаються з поверхні і розвиваються углиб. Розвиток реакцій, що призводять до утворення перехідних шарів, є головною умовою міцного зчеплення різнорідних матеріалів. [40, 453]. Можуть утворюватися проміжні шари, що підвищують або знижують міцність зчеплення [40, 453].

5.1.3 Використання дифузійної теорії адгезії в отриманні багатофункціональних покриттів комбінованим способом

Збільшення адгезії при азотуванні в імпульсному режиму ЕДН – покриттів пов'язано з явищем прискореної міграції атомів при явищі аномальної дифузії за рахунок утворення дифузійного прошарку (рис. 5.1, а) і прискорення аномальної дифузії (табл. 5.1). Швидкість дифузії прискорюється на кілька порядків (табл. 5.1).

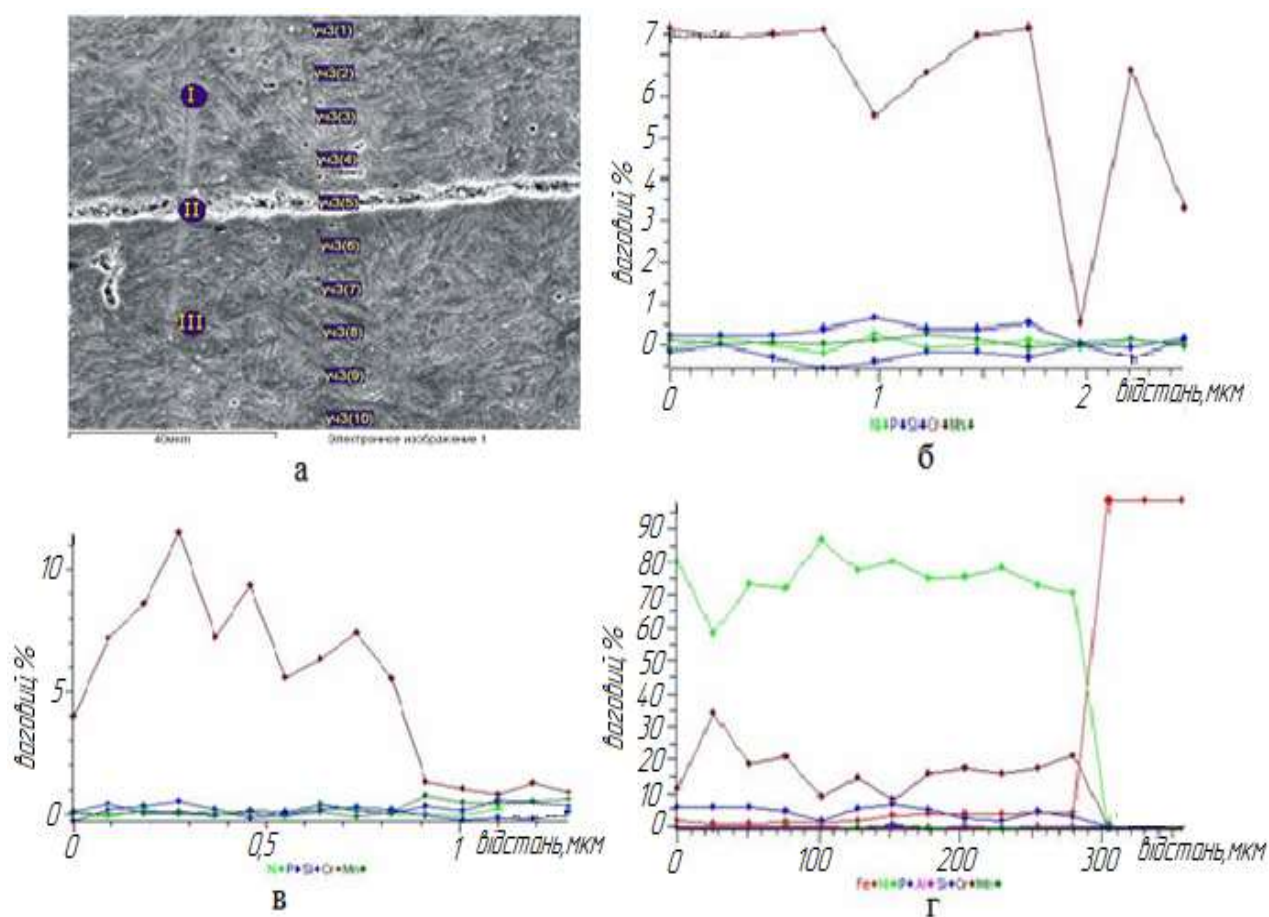
За допомогою методів металографічного [розділ 3, п.3.4] і рентгеноспектрального аналізу [розділ 3, п.п. 3.4] досліджували перехідну зону системи «відновлена поверхня – покриття», вивчали структуру і властивості міжфазної, інтерфейсної проміжної зони. З цією метою проводили металографічні і рентгеноструктурні дослідження межі розділу «відновлена поверхня – покриття» (рис. 5.1 а). Металографічний аналіз перехідної зони системи «покриття – відновлена поверхня» показав, що утворюється дифузійний шар, що забезпечує міцність зчеплення

100 – 120 МПа. Дифузійна взаємодія на межі розділу фаз призводить до утворення міжфазної шару (рис. 5.1). Морфологія (топографія) поверхні покриттів досліджувалася в режимі відбитих електронів при напрузі 10 – 20 кВ. Застосовували два типи досліджень: спектр з поверхні шліфа і структура поверхні в поєднанні з Υ – модуляцією, тобто – повільне сканування електронного пучка вздовж лінії з реєстрацією рентгенівського випромінювання по кожному елементу з і побудовою концентраційних кривих розподілу. Крім того, проводився точковий мікрорентгеноспектральний аналіз за програмою кількісного аналізу (розділ 3, п.п. 3.4).

Результати досліджень представлені на рис. 5.1 та 5.2, результати дослідження розподілу елементів по поверхні наведено на рис. 5.1 б, в, г. Кожному з елементів присвоюється умовний колір. Всі інші кольори утворюються при накладенні трьох основних і говорять про взаємну присутність елементів на тій чи іншій ділянці зразка, а концентрація в цьому випадку визначається щільністю кольору. Застосування цієї програми досліджень дає дуже хороші результати для розуміння механізмів дифузійних процесів (розділ 3, п.п. 3.4).

З металографічного аналізу поверхні розділу напилених покриттів і основного металу відновлюваної поверхні видно, що вони зовсім не мають розвинутого рельєфу. Оплавлення основи при напиленні показує, що термічна активація призводить не тільки до посилення хімічної взаємодії, а й утворення перехідного дифузійного шару, що збільшує міцність зчеплення (рис. 5.1, а).

На рис. 5.1, б, в, г і рис. 5.2 представлені складові покриття (хром, никель, залізо, тощо.), що свідчить про те, що склад покриття після його нанесення не змінюється (має місце принцип технологічної спадщини Ящерицина), що свідчить про якість відновлених поверхонь і позитивний вплив на матеріал покриття вибраної технології.



Спектр	Хімічний елемент						
	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni
уч3 (1)	0,06	3,39	0,00	38,97	0,30	5,17	52,23
уч3 (2)	0,14	1,65	-0,41	34,46	0,10	4,00	60,06
уч3 (3)	0,03	6,48	-0,02	8,45	0,26	5,87	78,92
уч3 (4)	0,09	0,73	-0,17	27,49	0,03	4,79	67,04
уч3 (5)	0,12	2,60	0,08	14,12	-0,07	4,59	78,80
уч3 (6)	0,27	5,62	0,23	13,49	0,15	4,90	75,35
уч3 (7)	0,25	0,97	0,05	74,51	0,17	3,59	20,96
уч3 (8)	0,06	0,09	0,01	2,67	0,76	92,90	3,65
уч3 (9)	0,01	0,47	0,16	0,79	0,45	96,65	1,82
уч3 (10)	0,35	0,45	0,14	0,47	0,40	97,49	0,70
уч3 (11)	0,24	0,69	0,24	0,45	0,51	98,24	0,11

Рисунок 5.1 – Мікроструктура відновленої поверхні з покриттям ($\times 200$).
 Розподіл легуючих елементів (матеріал покриття 40X13): 1 - покриття;
 2 - перехідна зона (дифузійна зона); 3 – відновлена поверхня деталі

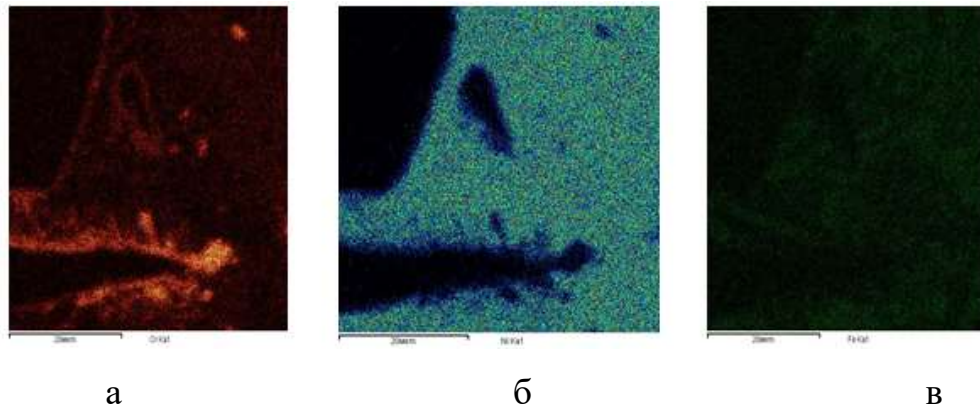


Рисунок 5.2 – Складові покриття із сталі 40X13: а – нікель; б – хром;
в – залізо

Збільшення міцності зчеплення при нанесенні покриттів комбінованим методом, що включає напилення і азотування в імпульсному режимі, відбувається не тільки за рахунок механічних сил, але і за рахунок дифузійних процесів. При дії імпульсів при ПА ЕДН – покриттів швидкість дифузії прискорюється на кілька порядків (табл. 5.2). За своєю суттю ПА є вторинною ТО, яка сприяє завершенню розпочатих при напиленні фізико – хімічних процесів і поліпшення кінцевої якості покриттів. Розрахунок коефіцієнтів дифузії проводили за методом Матано [40]:

$$D = \frac{1}{\tau} \frac{dx}{dC} \int_0^c x dC \quad (5.10)$$

де τ - час проходження дифузії; $\frac{dx}{dC}$ - похідна (відстань від нульової лінії)

по C (концентрації); $\int_0^c x dC$ - інтеграл від цієї функції при граничних значеннях концентрації

Відповідні коефіцієнти дифузії (масопереносу) представлені в табл. 5.1. З її розгляду випливає, що швидкісна деформація призводить до збільшення рухливості атомів як в покритті, так і в поверхні, що зміцнюється на 8 – 10 порядків.

Таблиця 5.1 – Коефіцієнти дифузії (масопереносу) при квазістатичному (D) і імпульсному (DM) впливах

Дифузанти	Метал	$D \times 10^9 \text{ см}^2/\text{с}$	$DM \times 10^5, \text{ см}^2/\text{с}$
Ni	Залізо (основа)	0,4	3,0
Cr	Нікель (покриття)	6,5	6,3
W	Залізо (покриття)	3,2	5,2
Fe	Нікель (покриття)	7,6	3,9
Al	Нікель (покриття)	65,0	7,1
Mn	Нікель (покриття)	98,0	9,2

Таким чином, збільшення адгезії при ПА ЕДН-покриттів пов'язано з явищем аномальної дифузії при масопереносі за рахунок утворення значного дифузійного прошарку (рис. 5.1 а) і прискорення аномальної дифузії (табл. 5.1).

Швидкість дифузії прискорюється на кілька порядків (табл. 5.1). Адгезійна міцність підвищується за рахунок дифузійних процесів завдяки ефекту аномального переносу. Цей ефект реалізується в ЕДН – покриттях шляхом переходу від ізотермічного характеру процесу до термоциклічного при їх обробці ПА [40, 41]. Виникнення циклічних напружень забезпечує прискорену дифузію і необхідний рівень адгезійної міцності покриттів.

Головна особливість азотування в імпульсному режимі – використання ефекту аномального масопереносу азоту на поверхні відновлюваної деталі, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення тліючого розряду [7,13, 36, 38].

Підвищення функціональних властивостей і терміну служби відновлюваних поверхонь деталей ЗТ потребує вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів при їх обробці азотуванням в імпульсному режимі [41].

Для вирішення проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах покриттів в процесі їх ПА 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 напилених шарах покриттів. На основі проведеного аналізу запропонована постановка задачі управління дифузійним насиченням пористих напилених покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування [п.п. 4.7, 421]. Широке впровадження даного ефекту призводить до необхідності управління цим явищем - вибором параметрів зовнішніх впливів, які зможуть сформувати покриття на відновлюваній поверхні із заданим комплексом властивостей.

5.1.3 Аналіз існуючих методів і методик визначення адгезійної міцності покриттів, їх недоліки і переваги. Рекомендації по вибору способу випробувань на адгезійну міцність

Для дослідження адгезійної міцності системи «відновлена поверхня— покриття» широко використовуються різні експериментальні методи. Властивості покриття істотно залежать як від способу, так і від технологічних режимів їхнього нанесення. Інформація щодо адгезійної міцності системи «відновлена поверхня – покриття» наведена у літературі, часто суперечлива. Ця обставина підтверджує великий інтерес до проблеми і показує її актуальність. Той факт, що результати визначення адгезійної міцності системи «відновлена поверхня – покриття» не завжди коректно порівнянні, дозволяє зробити висновок про недосконалість методологічного підходу до досліджень. Нижченаведений аналіз дозволяє оцінити проблему в цілому, способи її дозволу, а також показати тенденції й перспективи в дослідженні адгезійної міцності системи «відновлена поверхня – покриття».

Нині розроблена значна кількість методів і пристроїв для оцінки міцності з'єднання покриттів з поверхнею, що відновлюється [442 – 460]. В той же час, єдиної методики не існує. Різноманіття приведених в літературі [442 – 460] експериментальних даних по адгезійній міцності дуже великий, їх важко порівнювати і вони залежать як від умов випробувань, так і від геометрії зразків, що досліджуються.

Проведений тематичний патентний пошук по країнах СНД, США, ФРН, Франції, Великобританії і Японії дозволяє зробити попередню систематизацію методів випробувань, яка наводиться нижче (рис. 5.3). Оцінка адгезійної міцності методами неруйнівного контролю на підставі структурного аналізу до цієї систематизації не увійшла.

Вимір адгезійної міцності покриттів з відновлюваною поверхнею, вимагає розробки спеціальних методів, основне призначення яких полягає в проведенні кількісного і якісного контролю виробів, а також у вивченні процесів, що відбуваються на основі при формуванні покриттів.

Експериментальні методи і методики визначення міцності зчеплення конструктивних елементів з покриттями ділять на якісні і кількісні [442 – 460]. Якісні методи - це наближена оцінка, достатня для виробничого контролю. Вони не пояснюють фізико-хімічні процеси формування покриттів [453]. До відносних методів (непрямим) оцінки міцності зчеплення ($\sigma_{зч.}$) можна віднести безрозмірну відносну величину – критерій зчеплення. Критерієм зчеплення є деформація основи ($\epsilon_{кр.}$), при якій настає розтріскування або відшаровування покриття [444 – 447]. Деформування здійснюють вигином, розтягом, стиском, крутінням, видавлюванням лунки, ударом. Загальний недолік цих методів - недостатня інформація про дійсну міцності зчеплення [453]. Методи прямої кількісної оцінки забезпечують оцінку адгезії в фізичних одиницях, розуміючи під міцністю зчеплення ($\sigma_{зч.}$) роботу або зусилля.

Відсутність єдиної методики оцінки параметрів, що характеризують адгезійну міцність, викликає необхідність приведення їх в систему з подальшою класифікацією. Класифікація методів випробувань дозволить вибрати необхідну методику, при якій умови проведення випробувань будуть адекватні реальним умовам роботи деталей. Окрім вказаного, вона дасть можливість отримати достовірні результати випробувань, сприятиме впливу на технологічний процес і забезпечить можливість його оптимізації. На підставі аналізу методів випробувань захисних покриттів на адгезійну

міцність розроблена класифікація (рис. 5.3). Вона дозволяє, виходячи з реальних умов експлуатації, вибрати певну методику. Умови випробувань за цією методикою мають бути максимально наближені до реальних.

Таким чином, практично всі методи експериментального визначення адгезійної міцності системи покриття-відновлена поверхня передбачають відрив покриття від деталі. Особливу групу методів випробувань систем з покриттям представляють штифтові методи [447, 453].

Основою для удосконалення існуючих методів була обрана схема нормального відриву конічного штифта [447, 453]. Цей тип зразка дозволяє виключити вплив тертя між штифтом і шайбою, звести до мінімуму зазор між ними. Методика конічного штифта, забезпечує визначення адгезійної міцності при зсуві і відриві. Цей вважають перспективним для стандарту по міцності зчеплення. Однак його недолік - помилка вимірювання досягає 20% [447, 453].

Таким чином, всі існуючі методи випробування системи «основа-покриття» спрямовані на отримання, як правило, однією характеристики міцності (адгезійної міцності), комплексний підхід практично відсутній [444 – 448, 453]. Когеційну міцність покриття можна визначити випробуванням на розтяг зразка з покриттям. Одночасне використання зазначених методів випробувань дозволить розширити знання по механічній поведінці деталей з покриттями, що забезпечить можливість проектування високоефективних технологічних процесів зміцнення об'єктів техніки.

У ряді випадків, характеристики адгезійної міцності, отримані на експериментальних зразках (наприклад, адгезійна міцність при нормальному відриві) не відповідає реальним показникам [444 – 448, 453]. Це пов'язано з неправильно вибраною методикою проведення випробувань, яка не відповідає умовам експлуатації виробу. Для уникнення значних розбіжностей в результатах адгезійної міцності експериментальних зразків і реальних виробів рекомендована певна послідовність операцій, необхідних при виборі методів випробувань матеріалів з покриттям (рис. 5.4).

На підставі аналізу умов експлуатації деталі були виявлені головні чинники, що лімітують її властивості міцності і другорядні, впливом яких можна нехтувати, визначалася допустима похибка методики проведення експерименту. Це дозволило спростити вибір силових режимів, а також середовищ випробувань, геометричні форми і розміри експериментальних зразків. Екстремальні умови експлуатації відрізняються високим рівнем напруги, температур, агресивних середовищ. Руйнування конструктивних елементів деталей обумовлено спільною дією експлуатаційних чинників – навантаження, температури, робочого середовища. Найбільш небезпечним з впливу втрати міцності є нестаціонарність термічного і силового навантаження.

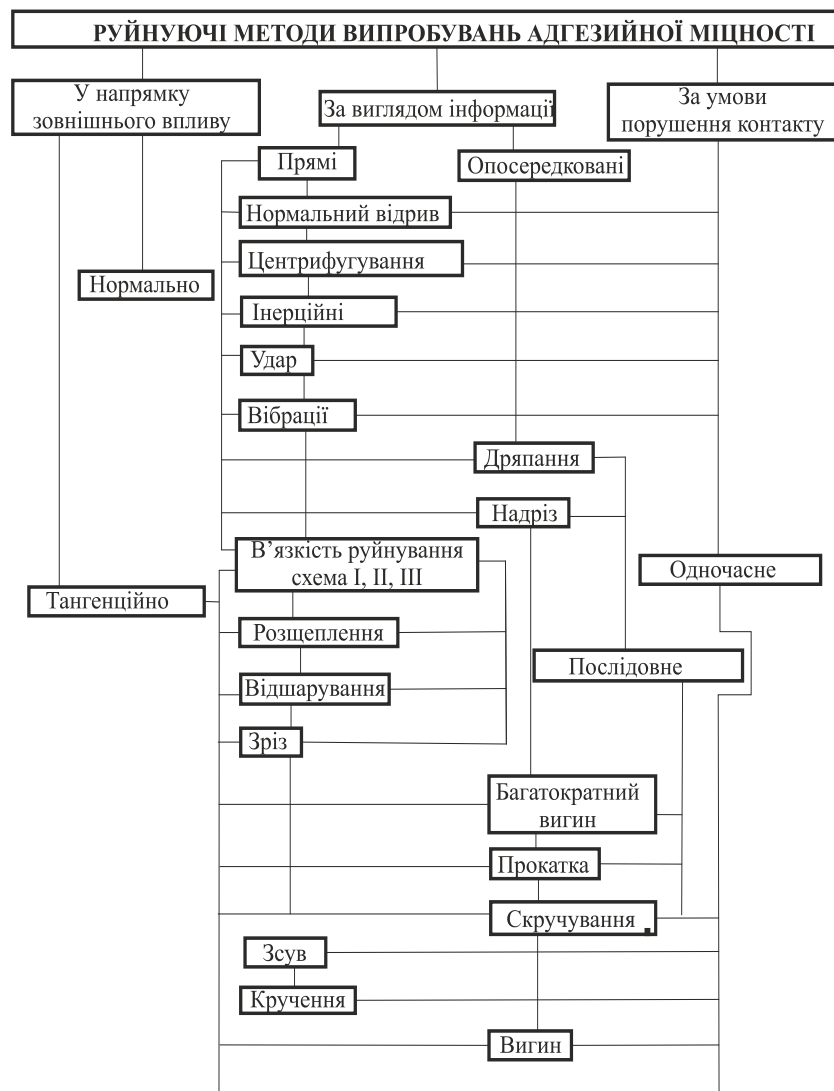


Рисунок 5.3 – Класифікація методів випробувань на адгезійну міцність

Характерна особливість експлуатації - це одночасність дії механічних навантажень, високих температур і агресивних середовищ.

Загальний ефект втрати міцності при одночасному впливі експлуатаційних факторів може бути незрівнянно вище суми ефектів при впливі кожного фактора окремо. Це називається явищем синергізму або неаддитивності дії [467, 487]. Неаддитивності дії спостерігається в різних комбінаціях експлуатаційних факторів. Більш різка неаддитивності дії навантаження, середовищ і нагрівання проявляється при циклічних змінах температури. Особливо небезпечна неаддитивності напруженого стану та корозійних процесів, так звана корозія під напругою або корозійне розтріскування.

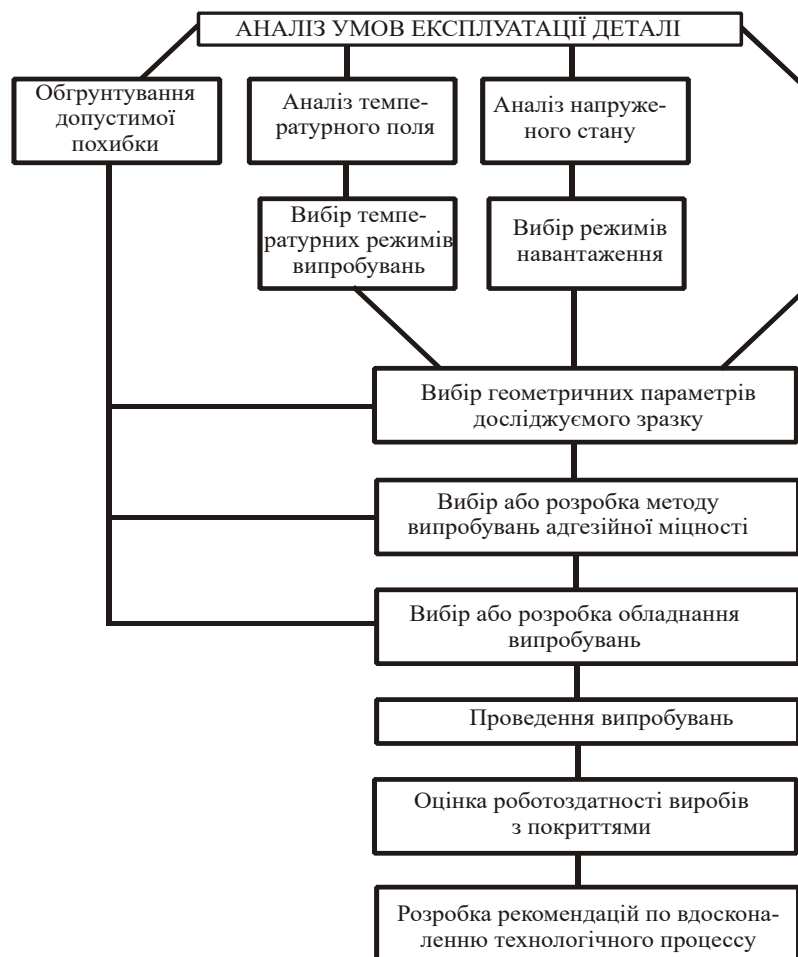


Рисунок 5.4 – Загальна схема вибору методів випробувань відновлених деталей з покриттями з урахуванням їх умов експлуатації

На наступному етапі здійснювався вибір методів випробувань і устаткування, які охоплюють вплив виявлених головних факторів. При цьому використовувалися оригінальні способи і пристрої, що більш повно відбивають умови експлуатації деталей. За результатами випробувань, які проводилися на експериментальних зразках відповідно до вибраної методики, здійснювалася оцінка працездатності деталей з покриттями та вибір оптимальних параметрів технології відновлення.

5.1.4 Визначення адгезійної міцності системи «покриття – відновлювана поверхня» розрахунково – експериментальною методикою

З огляду на низьку інформативність експериментальних методів визначення адгезійної міцності композиції «відновлювана поверхня-покриття», в роботі вирішено зупинитися на експериментально-розрахунковій методиці. Такий підхід дозволяє визначити весь комплекс механічних характеристик системи «відновлювана поверхня покриття» за одне випробування на одному зразку. Це обумовлено тим, що інформація, отримана при випробуванні на двох різних зразках, не співпадатиме з інформацією, отриманою за одне випробування на одному зразку, так як при нанесенні покриття матеріал зразка (основи) може змінити свої властивості [444 – 446]. Найбільш інформативною є методика складеного перерізу, розроблена в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України [444 – 446]. Ця методика випробувань дозволяє здійснити комплексне визначення механічних характеристик за одне випробування: модуль пружності покриття E_p , МПа; адгезійну міцність при зсуві τ_a , МПа; когезійну міцність покриття σ_k , МПа; критичну деформацію основи $\varepsilon_{кр}$, %; коефіцієнти Пуассона основи і покриття; зміну механічних властивостей основи (модуля пружності E_o , межі міцності $\sigma_{во}$, відносного подовження δ), викликане різними технологічними факторами (температурою, тиском, тривалістю витримки); залишкові напруження в покритті $\sigma_{зал}$, МПа [446]. За основу в цій

методиці було прийнято досліджування впливу на адгезійну міцність НДС основи (експериментального зразка) і були встановлені функціональні залежності між цими факторами [444 – 446, 473]. Недоліками методики є суб'єктивність контролю руйнування композиції і обмеженість її застосування матеріалами, які працюють тільки в зоні пружних деформацій [444 – 446]. Ідея методики полягає в тому, що на розтяг випробовується зразок з симетричним двостороннім покриттям, нанесеним до половини довжини зразка (розділ 3, п.п 3.9). Для досліджень використовувався плоский зразок (розділ 3, п.п 3.9). для випробувань на розтяг.

Випробування проводяться до моменту візуальної реєстрації руйнування композиції і припиняються після початку відшарування ділянок потрісканого покриття або при руйнуванні відновлюваної поверхні. Це дозволяє встановити тип руйнування покриття - адгезійне або когезійне і судити про когезійно – адгезійну рівномірність композиції «покриття – відновлена поверхня». При реєстрації когезійний руйнування покриття випробування тривають. Якщо адгезійне відшарування відбувається в області роботи тензодатчика покриття ($< 3\%$), то момент його відшарування, крім візуального контролю фіксується ще й тензодатчиком деформації покриття. Крім об'єктивності, така фіксація дозволяє судити про адгезійне руйнування покриття на тій стороні зразка, яка не спостерігається візуально. Після досягнення матеріалом відновлюваної поверхні 3% - ої деформації відбувається руйнування тензодатчиків, і подальше вимірювання деформацій проводиться катетометром КМ – 8 [446]. Результати експериментальних досліджень привели в табл. 5.2.

Важливим фактором при вирішенні завдань ефективного використання покриттів при зміцненні є співвідношення між адгезійною міцністю (міцністю зчеплення з основою) і когезійною міцністю покриття. В роботі [446] зазначено, що не завжди підвищення когезії призводить до зростання адгезії і навпаки. При цьому підкреслюється, що зайве зміцнення однієї ланки призводить часом до послаблення системи як єдиного цілого. Іншими

словами, адгезійна і когезійна міцність покриття повинні знаходитися в оптимальному співвідношенні між собою, досягнувши одночасно свого граничного значення на одному рівні критичної деформації основи.

Для визначення оптимального співвідношення адгезійної і когезійної міцності покриттів був запропонований критерій адгезійн – когезійної рівноміцності [446]. Суть критерію полягає в тому, що оптимальне з точки зору міцності покриття повинне відшаровуватися і розтріскуватися одночасно. При електродуговому напиленні покриття можна розглядати як двошарове, в якому має місце проміжний дифузний шар (рис. 5.1, а), який відрізняється по структурі, складу і властивостям.

Таблиця 5.2 – Залежність адгезійної міцності від товщини покриття

№ експ.	Товщина покриття, мкм	Матеріал основи	Матеріал покриття	Адгезійна міцність, МПа
1	-	Сталь 45	-	-
2	100	Сталь 45	30X13	120
3	200	Сталь 45	30X13	1105
4	400	Сталь 45	30X13	115
5	100	Сталь 45	X18H10T	100
6	200	Сталь 45	X18H10T	1055
7	400	Сталь 45	X18H10T	112
8	100	Сталь 45	X18H10T	108
9	200	Сталь 45	X18H10T	103
10	400	Сталь 45	X18H10T	118
11	500	Сталь 45	40X13	109
12	500	Сталь 45	40X13	120
13	500	Сталь 45	40X13	110

Дослідження мікроструктури проводилося на нетравлених і травлених шліфах за допомогою світлового мікроскопа «MeF-3» фірми «Reichert» (Австрія) при збільшенні '100, '200, '500 (рис. 5.1, а). Технологія нанесення покриттів, реалізувалося на обладнанні, представленому в розділі 3, п.п. 3.2

Умова адгезійно – когезійної рівноміцності з виразів визначає значення $\tau_{зч1}$, $\tau_{зч2}$, $\sigma_{ВП2}$ і $\sigma_{ВП3}$, які при заданій величині деформації основи ε_0 досягають своїх меж міцності. Інакше кажучи, при одній умові ε_0 відбувається

одночасне адгезійне відшарування і когезійне розтріскування як дифузійного підшару, так і зовнішнього шару покриття.

Основна технологія - ЕДН з обробкою ПА, альтернативна технологія – електродугове напилення повітрям. Результати випробувань, проведених за методикою, описаною в розділі 3.2 [446], наведені в табл. 5.3. Товщина металевих зразків на розтяг становила $2H = 5$ мм, довжина покриття $l = 20$ мм, ширина $t = 10$ мм. Товщини покриттів і їх пружні властивості при розрахунках приймалися відповідно до результатів роботи [446]. Зміна пружних властивостей і геометричних розмірів покриттів може привести як до зниження, так і до підвищення рівня напружень в них. Отримані значення адгезійної і когезійної міцності наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.3 – Геометричні і пружні властивості покриттів

Геометричні, пружні і характеристики міцності покриттів	Технологія основна (ЕДН + ПА)	Технологія альтернативна (ЕДН)
H_2 , мм	0,02	2
H_3 , мм	1,5	1,5
E_1 , ГПа	209	209
E_2 , ГПа	135	60
E_3 , ГПа	60	60
$\sigma_{вп2}$, МПа	180	70
$\sigma_{вп3}$, МПа	200	70
τ_1 , МПа	190	80
τ_2 , МПа	210	80

Таблиця 5.4 – Оптимальна адгезійна міцність

Адгезійна міцність	ЕДН+ ПА (технологія основна)		ЕДН (альтернативна технологія)	
	розрахункові значення	експериментальні значення	розрахункові значення	експериментальні значення
$\tau_{3ч1}$, МПа	100 – 110	100 – 105	40 – 45	35 – 40
$\tau_{3ч2}$, МПа	90 – 100	100 – 102	45 – 50	40 – 45

Таким чином, адгезійна міцність є критерієм якості відновлених поверхонь з покриттями. Адгезійна міцність залежить 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, адгезійна міцність покриттів при розпиленні матеріалу покриття продуктами згорання пропано – повітряної суміші в 2,0 – 2,5 рази перевищує адгезійну міцність покриттів, отриманих при розпиленні повітрям.

5.1.5. Визначення впливу параметрів комбінованої технології відновлення деталей ЗТ на адгезійну міцність покриттів

Основний вплив на адгезію має дистанція напилення (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Адгезійна міцність 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

Практичний досвід нанесення покриттів ЕДН свідчить про те, що їх адгезійна міцність залежить від мікроструктури та розміру частинок, що розпилюються. Дослідження показали вплив розміру частинок, що розпилюють, на адгезію покриттів (рис. 4.11).

Для ЕДН – покриттів міцність зчеплення прямо пропорційна їх пористості (табл. 5.6). У покриттів із сталевих дротів 40Х13 і Х18Н10Т спостерігається зниження адгезії зі збільшенням пористості, а ніхром Х20Н80 не підкоряються цьому правилу (рис. 4.11). Пористість покриттів в діапазоні 5 – 14 % впливає позитивно на міцність зчеплення. а її збільшення понад 14 % призводить до зниження адгезії (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – 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

На базі використаних методів механіки і фізики міцності матеріалів проведені дослідження властивостей і експлуатаційних характеристик поверхонь після їх ЕІЛ. Основне завдання досліджень полягала в кількісному аналізі структурних і морфологічних особливостей поверхонь після ЕІО. При дослідженні використовувалися наступні матеріали: сталь 45 - основа; X20H80 - матеріал легуючого електроду.

Параметри процесу ЕІЛ: струми: 0,3А; 0,8А; 1,8А; фаза розряду: 180 °, 250 °, 320 °. Із залученням широкого кола фізичних методів дослідження: оптичної металографії, рентгеноструктурного аналізу, профілометрування, растрової електронної мікроскопії виконано аналіз структури, геометричних особливостей поверхонь після ЕІЛ в залежності від режиму обробки.

Методика кількісної стереофрактографії розроблена для оцінки шорсткості поверхні і відрізняється не тільки високою прецизійністю, а й тим, що вона дозволяє оцінити морфологічні особливості покриття одночасно в тривимірному просторі. Інформацію, отриману за допомогою методики кількісної стереофрактографії можна використовувати для кількісної оцінки геометричних параметрів рельєфу поверхні металу з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ.

У табл. 5.7 наведені результати оцінки величини шорсткості відновлюваних поверхонь після ЕІЛ. Проведений кількісний аналіз стереопар, отриманих на растровому електронному мікроскопі з поверхні сталей, що містять вогнища ЕІЛ (рис. 5.5), показав не тільки принципову можливість оцінки топографії зміцненої поверхні в тривимірному

вимірюванні, а й визначення з високою точністю геометричних параметрів покриття.

Таблиця 5.7 – Результати оцінки шорсткості поверхні після ЕІЛ

Марка сталі	Середній діаметрочагу ЕІЛ, мкм	Мах и Min значення розміру R_a , мкм
45	Ø75	11/4
X20H80	Ø 90	16/7
40X13	Ø 120	19/10
X18H10T	Ø 150	24/11

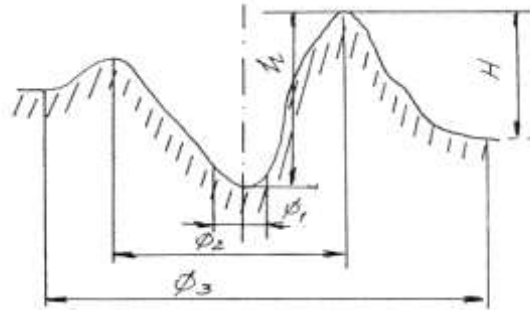


Рисунок 5.5 – Схематичне зображення вогнища ЕІЛ: ϕ_1 – діаметр вогнища; h , H – висота напливів металу поблизу вогнища ЕІЛ

Структуру шару після ЕІЛ добре можна проаналізувати на поперечних шліфах. При цьому встановлено, що товщина отриманого покриття в багатьох випадках не перевищує 15 – 40 мкм. При ефективному струмі процесу 0,3А утворюється покриття на відновлюваних поверхнях. При травленні шліфа в 4% розчині HNO_3 в спирті покриття має вигляд суцільного покриття. Товщина покриттів досягала 15 – 40 мкм в залежності від режиму легування. Дослідження структури і макроскопічних характеристик сталей при ЕІЛ необхідно при вирішенні питання оптимізації режиму ЕІЛ.

При дослідженні поверхонь після ЕІЛ встановлена немонотонна залежність її мікротвердості від величини струму режиму легування, наявність максимуму на цій залежності поблизу значень струму 0,6 – 0,8 А і показана прийнятна кореляція мікротвердості з параметрами шорсткості поверхні (стерео дослідження).

5.2 Дослідження впливу на адгезійну міцність системи відновлена поверхня-покриття залишкових напружень. Визначення залишкових напружень в покриттях методом графічного диференціювання

Для розрахунку несучої здатності КЕ деталей ЗТ з покриттям в процесі їх відновлення необхідно враховувати наступне:

- більшість покриттів, в тому числі і нанесені методом електродугового напилення з обробкою азотуванням в імпульсному режимі, вимагають фінішної механічної обробки після напилення для забезпечення необхідної чистоти поверхні і необхідних розмірів деталі. Крім операцій шліфування більш відомі методи чистового точіння інструментами з сучасних надтвердих матеріалів [512, 513]. Тому в товщині покриття h необхідно передбачити припуск на фінішну обробку;

- для чистового точіння деталі з покриттям рівень адгезійної міцності $\tau_{зч}$ повинен забезпечити можливість обробки без відшарування покриття. Тому міцність адгезійного зв'язку повинна мати запас, величина якого визначається режимами і умовами чистової обробки.

На адгезійну міцність системи відновлена поверхня-покриття впливають залишкові напруження ($\sigma_{зал.}$). Відомо, що при експлуатації, напруження, що діють в покритті, дорівнюють алгебраїчній сумі експлуатаційних і залишкових напружень [470 – 473]. Залишкові напруження в поверхнях з покриттями можуть виникати як внаслідок технології їх нанесення, так і в результаті експлуатаційного навантаження під дією статичних та динамічних навантажень [469 – 473].

Залишкові напруження розтягу в покритті небезпечні [473]. Їх вплив зменшує напруження стиску, циклічну міцність і межу міцності при статичному навантаженні матеріалів з покриттями [473]. Наявність інформації про величину і знак залишкових напружень дозволяє підвищити міцність і надійність, як самих покриттів, так і деталей з покриттями [473].

Збільшення залишкових напружень ($\sigma_{зал.}$) Може привести

дорозтріскування і відшарування покриття. З експерименту ми отримали інтегральну характеристику реальної адгезії і залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}$ (міцність утримання покриття на основі або технічна адгезія). Якби вдалося повністю виключити вплив на реальну адгезію залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$), то показники її були б занижені впливом концентраторів напружень. Таким чином, адгезійна міцність, яка визначається експериментально - це частина міцності утримання або ще менша частина реальної адгезійної міцності.

Існуючі теорії і гіпотези адгезії розглядають тільки співвідношення між теоретичною і реальною адгезійною міцністю і не суперечать, а лише доповнюють одна одну. Приймавши це за основу, ми досліджували вплив на адгезійну міцність залишкових напружень ($\sigma_{\text{зал}}$) і встановили функціональні залежності між цими факторами [469 – 473].

Аналіз отриманих раніше даних роботи [473] показує, що найбільш виражена форма прояву залишкових напружень – залежність міцності зчеплення $\tau_{\text{зч}}$ від товщини покриття h . Зі збільшенням товщини покриття h і залишкових напружень міцність зчеплення $\tau_{\text{зч}}$ знижується, аж до мимовільного відшарування. З даних, наведених в літературних джерелах [469 – 473] відомо, що для багатьох покриттів, в тому числі для напилених покриттів. Відзначається також, що тонкі покриття з високим рівнем залишкових напружень не відшаровуються, в той час як товсті покриття відшаровуються при більш низькому рівні залишкових напружень. Як правило, наявність залишкових напружень в покритті не дозволяє збільшити його товщину до необхідного розміру [469].

Критична товщина покриття обмежена і залежить від номінальної міцності зчеплення [470]. Залежність міцності зчеплення від товщини покриття обумовлена тим, що пружні напруження і енергія, що звільнюється, зменшують міцність зчеплення покриття. Проаналізовано [473] два випадки відшарування покриття - за рахунок деформування основи зовнішнім навантаженням та із зростанням товщини покриття.

Залежності міцності адгезійного зв'язку від деформації основи і від

товщини покриття - ідентичні (рис. 5.6), що свідчить про еквівалентність навантаження адгезійної зв'язку.

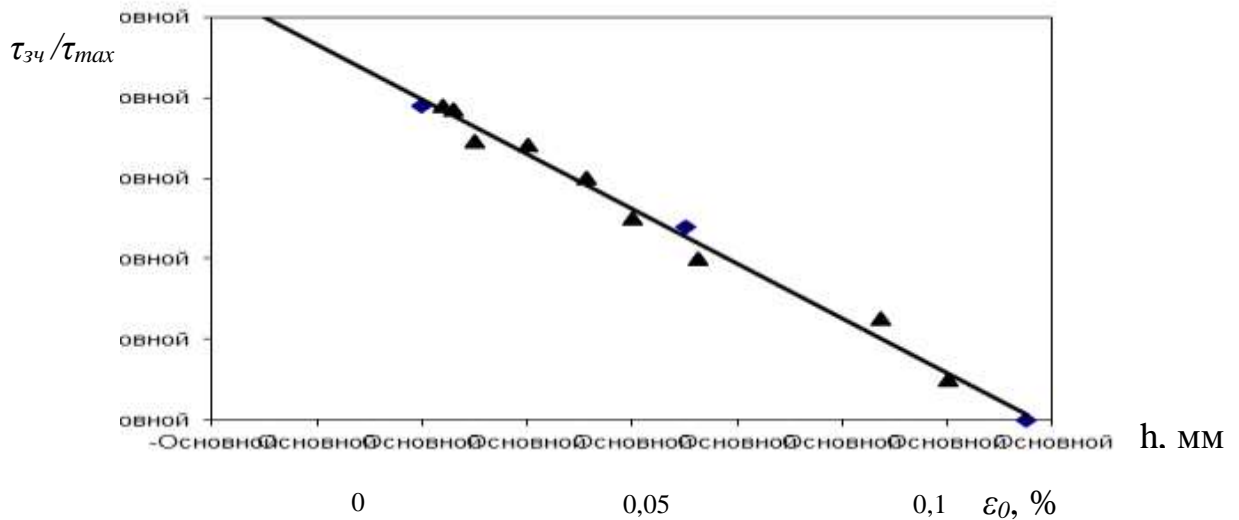


Рисунок 5.6 – Залежність відносної міцності адгезійного зв'язку від деформації основи ϵ_0 (•) (при розтягуванні основи) і товщини покриття h (▲) (при дії тільки залишкових напружень)

На відміну від більшості покриттів, покриття, отримані комбінованим методом електродугового напилення і їх обробкою азотуванням в імпульсному режимі [473], характеризуються товщиною 1,5 мм і більше при достатньо високому адгезійному зв'язку.

У роботі ми проводили оцінку залишкової напруги в покриттях, отриманих комбінованою технологією ЕДН і ПА, а також обґрунтування високої адгезійної міцності системи відновлена поверхня-покриття в умовах спільної дії експлуатаційних і залишкових напружень, виходячи з принципу еквівалентності навантаження адгезійної зв'язку. Цей принцип дозволяє встановити функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, залишковими напруженнями і деформацією основи.

Оцінку величини залишкових напружень проводили методом графічного диференціювання [369, 370]. Визначення залишкових напружень в покриттях здійснювали на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає в тому, що під дією залишкових

напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола [п.п.3.10, розділ 3]. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруження (рис 3.20, п.п. 3.10, розділ 3). Залишкові напруги $\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}$ згідно методу розрахунку тонких пластин на вигин визначали згідно методики п.п.3.10, розділ 3.

В роботі залишкові напруження в покриттях оцінювали методом графічного диференціювання [369 – 373], виходячи з принципу еквівалентності навантаження адгезійної зв'язку. Цей принцип дозволяє встановити функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, залишковими напруженнями і деформацією основи. Застосування методу графічного диференціювання залежно $\tau_{\text{зч}} = f(h)$ дозволило оцінити рівень залишкових напружень в покритті, і показати, що зростання товщини покриття призводить до зниження середнього значення залишкових напружень до асимптотичного мінімального значення [369 – 373]. З критерію рівномірності [444], замінивши когезійну міцність, викликану деформацією основи, еквівалентним залишковим напруженням $\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}$, можна визначити критичну товщину покриття $h_{\text{кр}}$ за умови відшарування під дією залишкових напружень:

$$h_{\text{кр}} = \frac{\tau_{\text{зч}}}{\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}} \frac{1}{kthkl}, \quad (5.11)$$

де $\tau_{\text{зч}}$ – міцність адгезійного зв'язку; k – коефіцієнт, що залежить від співвідношення пружних і геометричних параметрів системи відновлена поверхня – покриття; $2l$ – базовий розмір (прийнятий $l = 10h$);

$$k^2 = 2 \times \frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o} \times \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right) \quad (5.12)$$

де H_o, h_n – полутолщина основи і покриття; E_o, E_n, G_o, G_n – модулі пружності першого і другого роду матеріалів основи і покриття

Якщо залишкові напруження підвищуються або залишаються на тому ж рівні, буде відбуватися його відшарування. Саме це, найчастіше, обмежує можливість застосування покриттів великої товщини. Записавши вираз (5.11) як:

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}} = \frac{\tau_{\text{зч}}}{h} \times \frac{1}{kthkl}, \quad (5.13)$$

можна зробити висновок, що залишкові напруження в покритті характеризуються тангенсом кута нахилу експериментальної кривої, яка характеризує залежність міцності зчеплення від товщини покриття. Проаналізуємо залежність $\tau_{\text{зч}} = f(h)$ (рис. 5.7) для покриття із сталі 40X13, нанесеного на основу зі сталі 45 методом ЕДН з наступним ПА ($E = 2,4 \times 10^5 \text{ МПа}$, $G = 0,94 \times 10^5 \text{ МПа}$). Як видно, для розглянутого покриття з ростом його товщини спостерігається стабілізація міцності адгезійного зв'язку.

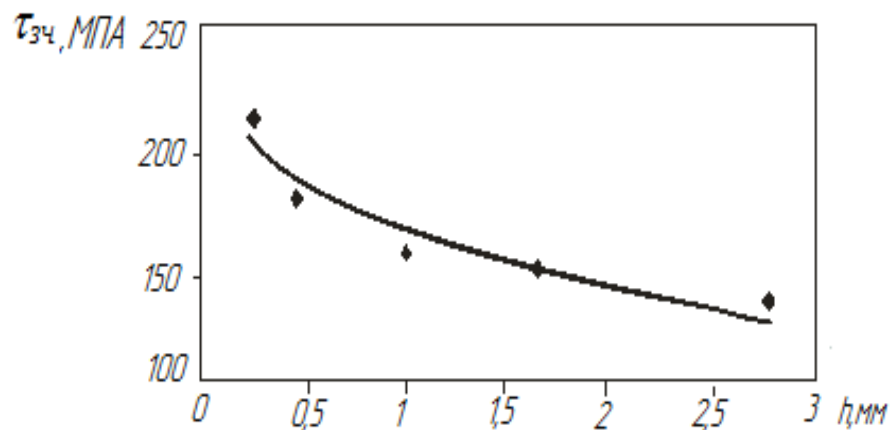


Рисунок 5.7 – Залежність адгезійної міцності від товщини покриття зі сталі 40X13, отриманого методом електродугового напилення з наступною обробкою азотуванням в імпульсному режимі

Застосування методу графічного диференціювання залежності $\tau_{\text{зч}} = f(h)$ з урахуванням поправочного коефіцієнта $1/kthkl$ дозволяє оцінити рівень

залишкових напружень в покритті і показати, що зростання товщини покриття призводить до зниження середнього значення залишкових напружень аж до асимптотичного мінімального значення (рис. 5.8). Аналіз граничного стану системи «основа – покриття» здійснювали виходячи з принципу еквівалентності навантаження адгезійної зв'язку. В умовах експлуатації, наприклад, при розтягуванні основи в виразі (5.13) $\sigma_{\Pi}^{\text{зал}}$ слід замінити ефективним напруженням $\sigma_{\Pi}^{\text{еф}}$, що є сумою залишкових $\sigma_{\Pi}^{\text{зал}}$ і експлуатаційних $\sigma_{\Pi}^{\text{експ}}$ напружень в покритті:

$$h = \frac{\tau_{\text{зч}}}{\sigma_{\Pi}^{\text{еф}}} \times \frac{1}{kthkl} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{\Pi}^{\text{еф}} = \sigma_{\Pi}^{\text{зал}} + \sigma_{\Pi}^{\text{експ}} \quad (5.15)$$

$$\sigma_{\Pi}^{\text{експ}} = E_{\Pi} \varepsilon_0^{\text{кр}}, \quad (5.16)$$

де $\varepsilon_0^{\text{кр}}$ - критична деформація основи, яка відповідає відшарування покриття під дією експлуатаційного навантаження

З урахуванням (5.12), (5.13) вираз (5.14) має вигляд:

$$h = \frac{\tau_{\text{зч}}}{(E_{\Pi} \varepsilon_0^{\text{кр}} + \sigma_{\Pi}^{\text{зал}})} \times \frac{1}{kthkl} \quad (5.17)$$

Звідси можливо записати:

$$\varepsilon_0^{\text{кр}} = \frac{\tau}{E_{\Pi} h kthkl} - \frac{\sigma_{\Pi}^{\text{зал}}}{E_{\Pi}} \quad (5.18)$$

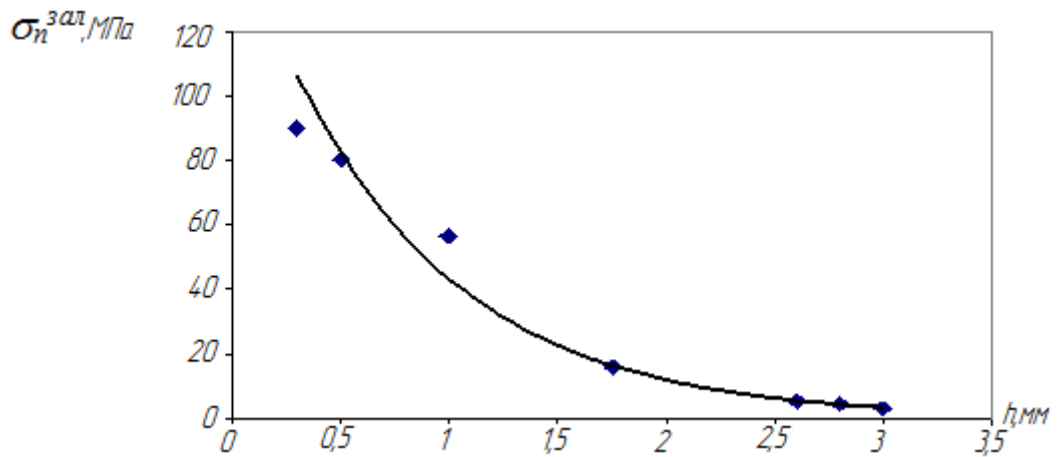


Рисунок 5.8 – Залежність залишкових напружень від товщини покриття із сталі 40X13 на основі нікелю, отриманого методом електродугового напилення з наступною обробкою азотуванням в імпульсному режимі

Вираз (5.9) приводить до висновку, справедливому для покриттів, отриманих методом електродугового напилення з наступною обробкою азотуванням в імпульсному режимі: зниження залишкових напружень з ростом товщини покриття дозволяє наносити покриття зі збільшеною товщиною при одночасному підвищенні можливої критичної деформації основи. Таким чином, можна збільшити навантажувальну здатність системи «відновлена поверхня – покриття» без ризику відшарування покриття.

Для вибору оптимального співвідношення ε_0 , $\tau_{зч}$ і h на рис. 5.9 наведені їх залежності, розраховані за рівнянням (5.9) з урахуванням залишкових напружень. Криві 1, 2 і 3 побудовані для різних фіксованих значень $\tau_{зч} = f(h)$. Крива 4 отримана на основі експериментальної залежності з урахуванням залишкових напружень. Таким чином, методом графічного диференціювання експериментальної залежності адгезійної міцності від товщини покриття можна визначити залишкові напруги в покриттях, отриманих інтегрованою технологією.

За принципом еквівалентності залишкових напружень і критичних деформацій основи при відшаруванні покриття встановлений функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття,

критичної деформацією основи і залишковими напруженнями. Ця залежність дозволяє визначити характеристики основа-покриття для умов експлуатації.

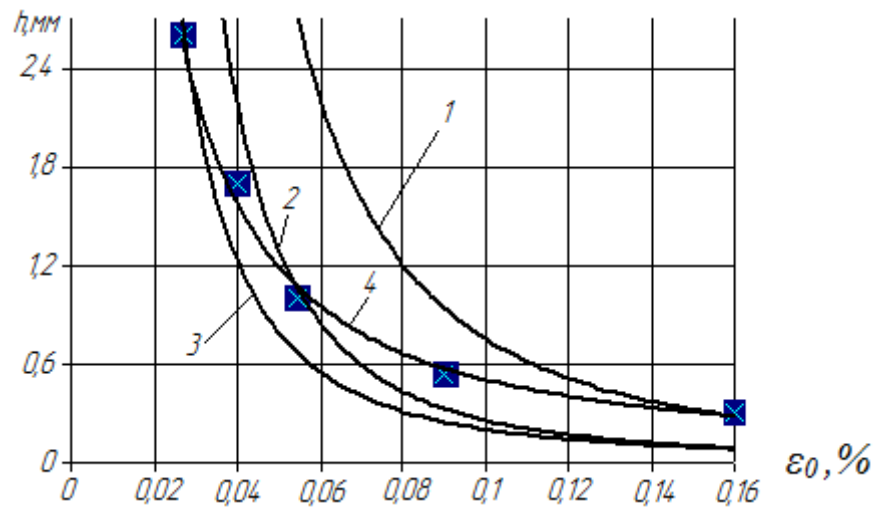


Рисунок 5.9 - Граничний стан системи «основа – покриття» при різних фіксованих значеннях $\tau_{3ч}$: 1 – $\tau_{3ч} = 200$ МПа, 2 – $\tau_{3ч} = 155$ МПа, 3 – $\tau_{3ч} = 135$ МПа; 4 - на підставі експериментальної залежності $\tau_{3ч}=f(h)$ з урахуванням залишкових напружень

Дослідження механічних властивостей (адгезійної міцності, залишкових напружень зміцнюваних поверхонь з покриттями, деформації основи і ін.) спрямовані на відпрацювання комбінованих технологій відновлення, а також для експериментальної перевірки критеріїв, розроблених на основі адгезійної міцності системи «відновлювана поверхня – покриття» [369 – 373].

5.3 Вплив матеріалу покриття на фазово-структурні перетворення і управління ними для забезпечення підвищення твердості і зносостійкості відновлюваних поверхонь

При виборі матеріалу покриттів в роботі запропоновано підхід, в основі якого лежить створення і використання фазово – структурних перетворень в покриттях при їх напиленні і обробці, і управління ними для забезпечення підвищення зносостійкості і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь.

Для реалізації запропонованого підходу в якості матеріалів покриттів обрані дротові сталі мартенситного і аустенітного класів, що обумовлено особливостями структурно – фазових перетворень в них при напиленні.

Експериментально встановлено, що в структурі покриттів при нагріванні дротяних сталей електричною дугою і їх розпилюванні надзвуковим потоком продуктів згорання пропано – повітряної суміші формується двофазна структура, яка містить аустеніт (200 – 300 HV) і певну кількість оксидів, що дозволяє отримати відновлені поверхні з високою твердістю і зносостійкістю.

При розпилюванні дротяних сталей 40X13 утворюється 30 – 50 об.% залишкового аустеніту. Однією з причин появи «аустенітного ефекту» в покриттях із сталі 40X13 є висока концентрація в них легуючих елементів (хрому і вуглецю) за рахунок повного розчинення карбідів хрому при розплавленні дроту і насиченні крапель розплаву вуглецем з полум'я факела. Таким чином, керуючи процесами структуроутворення при нанесенні покриттів з дротяних сталей мартенситного і аустенітного класів електродуговим напиленням можна отримати відновлені поверхні з необхідними експлуатаційними властивостями.

Дослідження показали, що фазовий склад покриттів включає: α – фазу (мартенсит), γ – фазу (аустеніт), оксиди Fe_3O_4 , γ – Fe_2O_3 (в слідах) і Cr_2O_3 (в слідах) (рис. 5.6). Твердість покриттів, отриманих з використанням різних схем напилення, перебувала в межах HV 2800 – 3500 МПа.

Газополуменеве напилення (режим 1) призводить до формування шару з відносно низьким рівнем твердості (HV = 2800 МПа), дуже високим вмістом залишкового аустеніту ($V_\gamma = 30 - 50$ об.%) і малою концентрацією оксидів (рис. 5.6). Пористість покриття становить $\cong 10\%$. Період кристалічної решітки мартенситу $a_\alpha = 0,2875$ нм, аустеніту $a_\gamma = 0,3596$ нм [43, 507].

Електродугове напилення в відновлювальній атмосфері (режим 2) призводить до утворення більш щільних покриттів (пористість $\cong 2 - 5\%$) твердістю HV = 3000 МПа, що відрізняються відносно низьким вмістом

залишкового аустеніту ($V_\gamma \approx 20$ об.%) і оксидів. Значення періодів кристалічної решітки мартенситу і аустеніту становлять відповідно $a_\alpha = 0,2875$ нм і $a_\gamma = 0,3592$ нм [8, 43].

Електродугове напилення реактивної струменем з надлишком повітря (режим 3) забезпечує формування щільного шару (пористість $\cong 2 - 5\%$) з найбільш високим рівнем твердості ($HV = 3500$ МПа) і відносно підвищеним вмістом продуктів окислення. Зміст залишкового аустеніту в модифікованому шарі знаходиться на рівні $V_\gamma \approx 20$ об.%

Параметр кристалічної решітки мартенситу $a_\alpha = 0,2875$ нм, а аустеніту $a_\gamma = 0,3592$ нм.

Покриття, отримані при розпилюванні струменем повітря (режим 4) мають твердість $HV = 3200$ МПа і зміст залишкового аустеніту $V_\gamma \approx 18$ об.% (Пористість $\cong 6 - 8\%$). Аналіз даних рентгенофазового аналізу показав, що після електродугового розплавлення і розпорощення повітряним струменем в покритті реєструється найбільш висока концентрація продуктів окислення. Значення $a_\alpha = 0,2875$ нм, аустеніту $a_\gamma = 0,3596$ нм.

Таким чином, встановлено, що структура ЕДН – покриттів, отримана розпиленням одного і того ж матеріалу різними режимами напилення відрізняється фазовим складом. Результати дослідження фазового складу і твердості покриттів зі сталі 40X13, свідчать про істотний вплив режиму напилення на структуру і властивості шару. Відмінною особливістю напилених шарів є присутність в них аномально великої кількості залишкового аустеніту (до 30 об.%) і оксидів. Звичайне вміст залишкового аустеніту в загартованій сталі 40X13 не перевищує 3 – 5 об.% [98].

Твердість покриттів, отриманих з використанням різних схем напилення, перебувала в межах $HV 2800 - 3500$ МПа.

Рентгенофазовий аналіз показав, що після ЕДН повітряним струменем в покритті реєструється найбільш висока концентрація продуктів окислення.

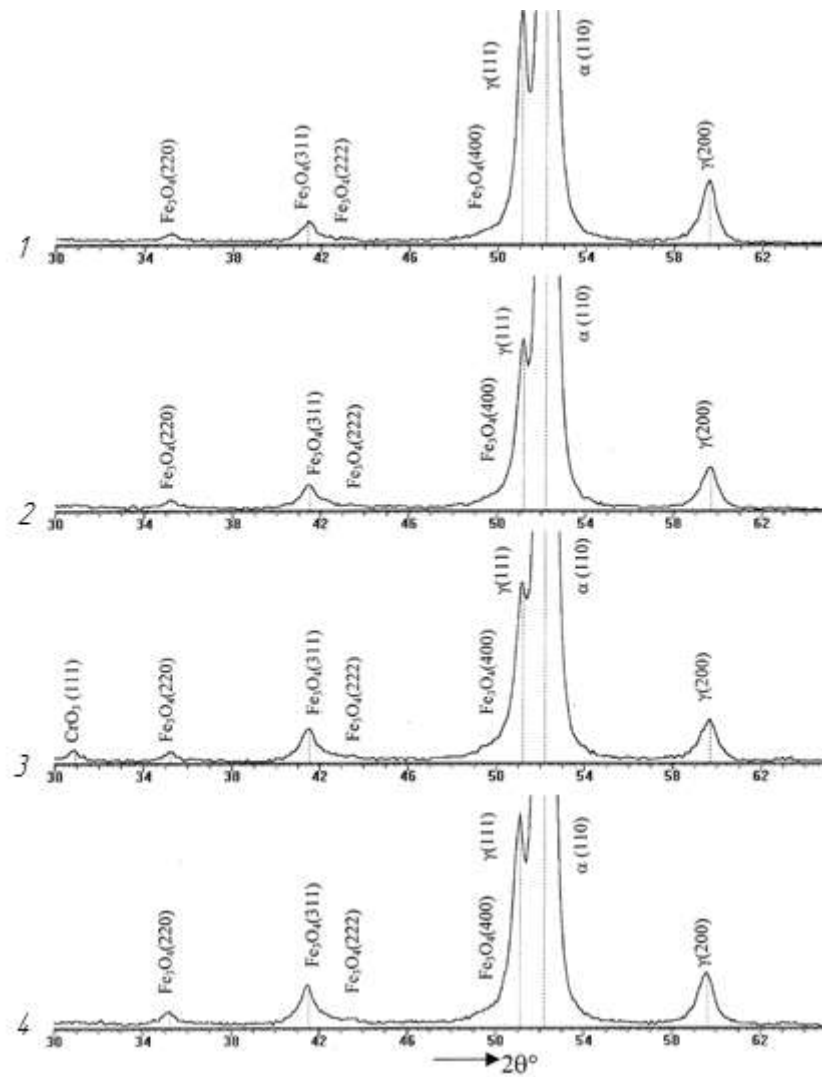


Рисунок 5.10 – Фрагменти рентгенівських дифрактограм ($\text{CoK}\alpha$) від поверхневих шарів газотермічних покриттів, отриманих на режимах 1 – 4

Таким чином, напилення покриття з дротяної сталі 40X13, сформований в умовах швидкої кристалізації крапель розплаву і їх подальшого охолодження, характеризується більш високою стійкістю аустеніту в порівнянні з вихідним матеріалом.

Відомо [256], що основними факторами, що впливають на вміст залишкового аустеніту в загартованій сталі, є швидкість охолодження сталі, концентрація легуючих елементів в аустенітній фазі, термічна стабілізація аустеніту при самовідпуску. Для перевірки впливу швидкості охолодження дротяної сталі 40X13 на вміст у ній аустеніту проводилася досвідчена гарт, використаної для напилення дроту, в умовах швидкісного охолодження.

Температура ізотермічної витримки зразків дроту стали 40X13 при нагріванні під загартування вибиралася рівною 1350 К, час витримки - 20 хв, охолодження здійснювалося в солоній воді (15% NaCl). Результати фазового аналізу загартованої дротяної стали 40X13 свідчать про відсутність в ній залишкового аустеніту при збереженні незначної кількості карбїду хрому Cr_{23}C_6 . Значення періоду кристалічної решітки для мартенситу загартованої дроту становить $a_\alpha = 0,2873$ нм, що трохи нижче рівня a_α для напилених покриттів. Таким чином, швидкісна гарт дротяної стали 40X13 не призводить до стабілізації залишкового аустеніту в ній.

Однією з найбільш ймовірних причин появи «аустенітного ефекту» в покриттях є відносно більш висока концентрація в них легуючих елементів (хрому і вуглецю) за рахунок повного розчинення карбїду хрому при розплавленні дроту і насичення крапель розплаву вуглецем з полум'я пропану. Про це, зокрема, свідчить відсутність в покритті частинок карбїду Cr_{23}C_6 . Далі, при аналізі причин стабілізації аустеніту в шарі, необхідно мати на увазі, що при нанесенні покриття поверхневі шари композиту розігріваються до температур 500 – 670 К. Внаслідок цього напиленням покриття в процесі його формування та охолодження проходить стадію ізотермічної витримки при 520 – 670 К, що сприяє термічній стабілізації аустеніту [134].

Додатковим фактором, що збільшує стійкість аустеніту в напилених шарах, як вже раніше зазначалося, виступає насичення крапель розплаву вуглецем в процесі розплавлення і розпорошення використовують відкритий вогонь пропану (табл. 4.2).

Відносно низька швидкість польоту розплавлених частинок стали, а також висока концентрація вуглець пропану в продуктах горіння сприяє більш глибокого насичення крапель розплаву вуглецем. Очевидно, що саме з цими обставинами пов'язане найбільш високий вміст залишкового аустеніту в покриттях, отриманих газополумєневим напилення (режим 1).

Дещо менша кількість аустеніту в покриттях, отриманих активованим

електродуговим напиленням в відновлювальній атмосфері розпилювального факела (режим 2) обумовлено, мабуть, істотно більш високою швидкістю польоту розплавлених частинок, характерною для даного способу напилення.

В цьому випадку процеси дифузійного насичення крапель розплаву вуглецем з відновлювальній атмосфері продуктів згорання пропано – повітряної суміші пройти не встигають (час польоту розплавлених крапель в атмосфері продуктів згорання не більше 5×10^{-4} с) і вміст залишкового аустеніту в шарі знижується до $V_{\gamma} \approx 20$ об. %. Збільшення концентрації кисню в суміші не супроводжується зміною кількості залишкового аустеніту в покритті, отриманому в умовах надзвукових швидкостей польоту розплавлених частинок (режим 3) і при відносно більш низьких швидкостях польоту частинок (режим 4). В обох варіантах напилення вміст залишкового аустеніту в шарі не перевищує 20 об. %. Ймовірно, такий вміст залишкового аустеніту в сталі 40X13 є рівноважним для випадку повного розчинення в ній карбїду хрому і реалізації властивих для ГТН процесу умов охолодження розплавлених крапель сталі.

З метою активування процесу розпаду залишкового аустеніту в напилювання покритть проводився відпустку композиту (режим 1) при температурах 520, 620, 720, 770 і 820 К. Час витримки при відпустці становило 90 хв. Дані рентгенофазового аналізу свідчать про те, що розпад стабілізованого залишкового аустеніту напиляного шару відбувається в результаті високого відпустки при температурах 770 – 820 К. Відпустка при більш низьких температурах не супроводжувався зниженням кількості залишкового аустеніту в шарі. Висока температура відпустки, необхідного для розпаду аустеніту напиляного шару, мабуть, обумовлена температурою освіти в ньому карбїду хрому після виділення яких стійкість залишкового аустеніту різко падає. Твердість напиляного шару після відпустки при 770 К становить 2800 МПа.

Виходячи зі знайдених значень температури розпаду аустеніту, термообробка напилених деталей з метою підвищення твердості покриттів

практично неможлива. Це обумовлено тим, що газополуменеве напилювання дротом 40X13 застосовується, в основному, для відновлення поверхонь тертя ковзання сталевих і чавунних виробів, а висока температура наступної термообробки викликає незворотні зміни в структурі сталеві основи і призведе до деформації деталей.

Одним з основних вимог, яким повинні задовольняти поверхневі шари деталей трибосполучень, є пластичність в початковий період тертя для прискорення процесу приробітки, а також висока зносостійкість, твердість, адгезія до рідким змащенням в ході подальшої роботи вузла. Виконання цієї умови стосовно до сталей можливо тільки в тому випадку, коли в сталях сформована двофазна структура, яка містить метастабільний аустеніт, що має твердість 200 – 300 HV. В процесі приробітки внаслідок інтенсивної пластичної деформації метастабільний аустеніт трансформується в зносостійкий і твердий мартенсит (600 – 700 HV) за рахунок протікання деформаційного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. При цьому твердість приробленої поверхні тертя виходить на рівень, недосяжний при звичайних методах обробки покриттів.

Проведені дослідження дозволили припустити, що для методу ЕДН існують такі режими і розпилюються сталі, які дозволяють забезпечувати формування в покриттях великої кількості метастабільного аустеніту, який в процесі роботи трибосполучень перейде в мартенсит.

Для забезпечення формування в структурі напиляного покриття метастабільного аустеніту, що має низьку температуру протікання деформаційного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення (температура M_d), відповідну температур експлуатації вузлів тертя ковзання (270 – 320 K), необхідно досягнення певних умов формування покриття, а саме, температури нагріву (перегріву вище точки плавлення) дроту, її розпилення, швидкості охолодження розплавлених частинок і ступеня їх окислення, що призводять до зміни концентрації легуючих елементів.

Експериментальними дослідженнями було встановлено зв'язок між

величиною температури початку мартенситного перетворення матеріалу дроту T_M і кількістю метастабільного аустеніту, що утворюється в сформованому покритті (табл.. 5.8) [8, 43].

Таблиця 5.8 - Зміст метастабільного аустеніту в покриттях, отриманих розпиленням різних марок сталей

№ групи сталей	Марка сталі	Температура T_M , К	Температура нагріву при розпиленні, К	Вміст аустеніту в покритті, об.%
1	09Г2С, 40ХН, 20Х13, 40Х13	550 – 700	1700...2000 2100...2500 > 2600	25...45 17...20 < 6
2	9ХС, Х12МФ, 9Х12, Х6ВФ, 35ХНМ, 40ХФВА, 65Г	420 – 540	1700...2100 2200...2500 > 2500	15...25 8...12 < 6
3	08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 110Г13	70 – 110	1700...2000 2000...2500 > 2500	95...98 90...95 90...95

У легованих конструкційних сталей, а також у корозійностійких сталей мартенситного класу температура T_M знаходиться в межах 550 – 700 К (група сталей №1). При розпилюванні дротів з цих сталей встановлено, що об'ємний вміст метастабільного аустеніту досягає 45%, якщо температура нагріву дроту не перевищує 2000 К.

У корозійностійких і жаростійких сталей, і у стали Гадфільда температура T_M становить 70 – 110 К (група сталей №3). У зв'язку з низькою температурою початку мартенситного перетворення, аустенітна структура у цих сталей характеризується високою стійкістю, тому їх так і називають - «стали аустенітного класу». Для фазового зміцнення поверхневих шарів сталей аустенітного класу за рахунок протікання мартенситного перетворення потрібні високі ступеня деформації, недосяжні при фрикційної взаємодії з мастильним матеріалом (граничне тертя). Встановлено, що

шляхом термічного розпилення дротів з цих сталей при температурах понад 2500 К можна підвищити температури T_M ,

Температура протікання деформаційного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення (температура M_D) здійснює дестабілізацію аустенітної фази в формованих покриттях.

Зниження стабільності аустеніту у покриттів з сталей третьої групи, розпиленням при температурах понад 2500 К, пояснюється наступним. Найбільший вплив на стан температурного інтервалу мартенситного перетворення надає вміст у стали марганцю і хрому. Так, зменшення вмісту марганцю від 5% до 1%, призводить до підвищення температури M_H з 270 до 470 К [8, 43].

У зв'язку з цим одним з можливих шляхів підвищення температури T_M є зменшення вмісту хрому або марганцю в аустенітній фазі сталей шляхом її окислення при напиленні. Зміна складу покриття, обумовлене інтенсивним окисленням при температурах понад 2500 К, дозволило знизити стійкість аустенітної структури і підвищити температуру M_D до рівня кімнатних температур.

При розпилюванні дротів з сталей перших двох груп збереження великої кількості метастабільного аустеніту можна пояснити наступним. Висока швидкість кристалізації сталевих частинок в процесі формування напиляного шару і уповільнена швидкість його охолодження в інтервалі мартенситного і бейнитного перетворень при охолодженні покриття забезпечують термічну стабілізацію аустеніту. Термічна стабілізація посилюється, якщо попередньо підігріти основу. Збільшення вмісту метастабільного аустеніту спостерігалось при підігріві поверхні деталі до 480 К (рис. 5.11). Подальший нагрів деталі викликав зниження значень міцності опору відриву покриттів. Попередній підігрів деталі перед напиленням легованих дротяних сталей з високою температурою T_M посилює ефект стабілізації аустеніту і дозволяє збільшити обсяг метастабільною фази в напилених покриттях.

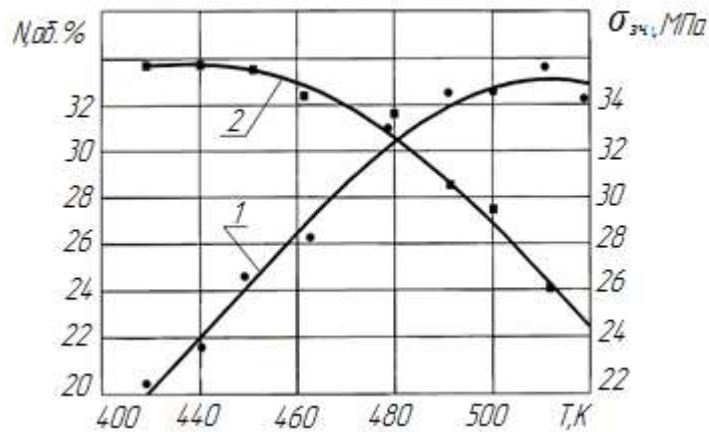


Рисунок 5.11 – Залежність кількості метастабільного аустеніту (об.%, 1) від попереднього підігріву деталі

Математична обробка отриманих експериментальних результатів дозволила отримати вираз, що описує залежність необхідної температури нагріву дроту від температури початку мартенситного перетворення сталі, з якої виготовлений дріт:

$$T_H = \frac{\lambda_M T_i (T_i + T_M)}{T_M}, \quad (5.19)$$

де T_H – температура нагріву, град.; T_M – температура початку мартенситного перетворення, К; λ_M – коефіцієнт, чисельно = 19,5 – 20,4; T_i – коефіцієнт, чисельно рівний 79 – 82 К

5.4 Дослідження залежності мікротвердості відновлених поверхонь деталей ЗТ від режимів ПА

Процес ЕДН не дозволяє отримувати покриття зі сталей підвищеної твердості і зносостійкості через вигорання вуглецю і легуючих елементів.

Ефективним вирішенням завдання підвищення експлуатаційних характеристик відновлюваних поверхонь деталей ЗТ ЕДН – покриттями з

дротяних матеріалів є формування в них високоміцних поверхневих шарів з багатошаровою структурою шляхом їх обробки ПА. Обробка ПА забезпечує формування нітридів з підвищеною твердістю (табл. 4.10, табл. 4.11). Мікротвердість модифікованих азотом шарів на ЕДН – покриття становить від 5600 до 12000 МПа (табл. 5.19).

Таблиця 5.9 – Вплив температури ПА на мікротвердість модифікованих ЕДН – покриттів

Матеріал покриття	Мікротвердість, ГПа при разній температурі азотування, К						
	600	620	650	670	700	720	770
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

Змінюючи температуру процесу ПА можна регулювати мікротвердість (табл. 5.9, рис. 5.12,а) і глибину дифузійного шару (рис. 5.12,б) ЕДН – покриття. Мікротвердість модифікованого напиленого шару ЕДН – покриття в результаті обробки при 750 – 820 К досягає значень 11000 – 12000 МПа (табл. 5.9).

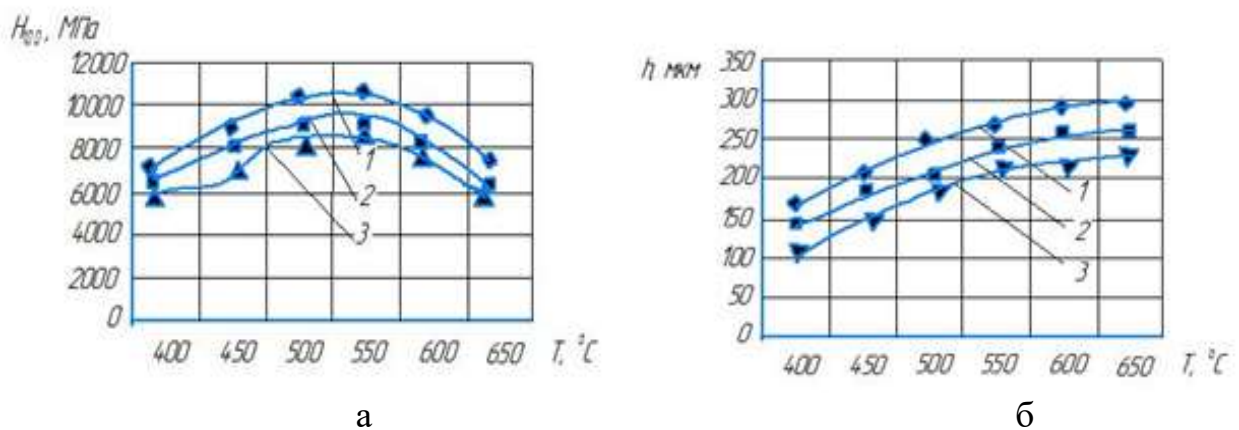


Рисунок 5.12 – Залежність мікротвердості ЕДН – покриття (а): $P = 150$ Па;

1 = 3 год.): 1 – $90\%N + 5\%C_3H_8 + 5\% Ar$; 2 – $95\%N_2 + 5\%C_3H_8$;

3 – $80\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 15\%Ar$ та товщини дифузійного шару (б): ($90\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 5\% Ar$; 1 = 3,5 год.): 1 – $P = 200$ Па; 2 – $P = 150$ Па; 3 – $P = 75$ Па

від температури азотування

Підвищення мікротвердості (табл. 5.9, рис. 5.12 – 5.14) іонно – азотованих ЕДН – покриттів здійснюється згідно з механізмами, внесок яких залежить від різних факторів (температури азотування, матеріалу напиленого покриття, параметрів ПА і тощо.):

- утворення структур з фазами, що зміцнюють (нітридів, і ін.), що викликає дисперсійне підвищення твердості;
- деформаційне зміцнення при пластичному зміні форми іонно-азотованого шару;
- зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, які створюють енергетичний бар'єр і ускладнюють переміщення дислокацій;
- зменшення розмірів зерен, що призводить до збільшення площі міжзерневих кордонів, які перешкоджають руху дислокацій;
- блокування дислокацій за рахунок спотворення кристалічної решітки, обумовлене об'ємним невідповідністю впроваджених атомів і появою виділень і пор;
- гальмування дислокацій впровадженими елементами (атомами, комплексами) і радіаційними ефектами.

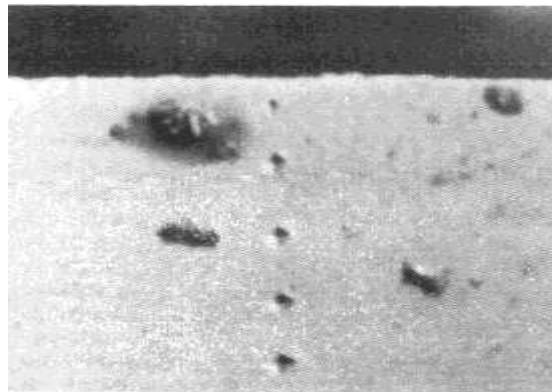


Рисунок 5.13 – Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару

Внесок перерахованих механізмів підвищення мікротвердості ЕДН – покриттів після ПА залежить від таких факторів як температури азотування, матеріалу покриття, який обробляється ПА, параметрів ПА.

Суттєвою вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару і товщину дифузійного шару має тиск (рис. 5.14) і склад реакційного газу

(табл. 4.7). Щодо впливу на мікротвердість складу реакційного газу встановлено, що максимальних значень вона досягає за умови використання суміші $90\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 5\% \text{Ar}$, а мінімальних - при суміші $80\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 15\% \text{Ar}$ (табл. 4.7).

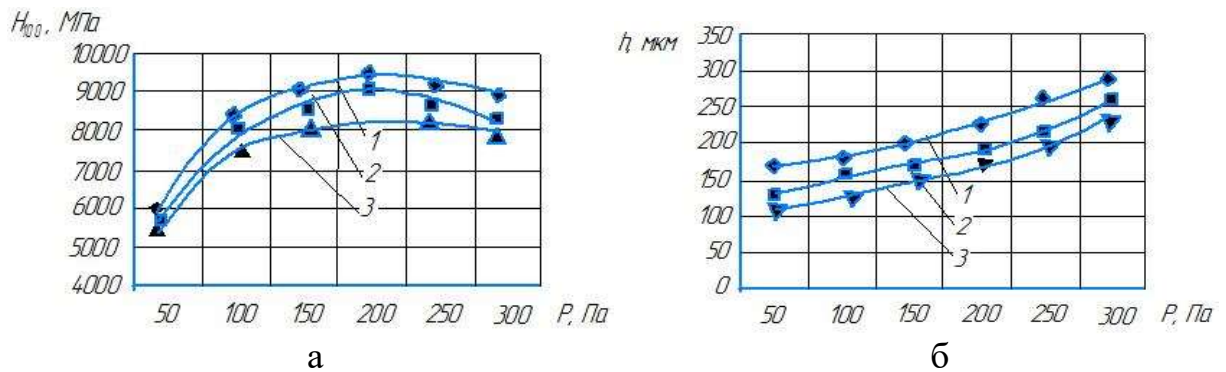


Рисунок 5.14 – Залежність мікротвердості ЕДН – покриттів (а): ($T = 500^\circ \text{C}$; $90\% \text{N} + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 5\% \text{Ar}$): 1 – $t = 1$ годину; 2 – $t = 2$ години; 3 – $t = 2,5$ години і товщина дифузійного шару (б): ($T = 550^\circ \text{C}$; $80\% \text{N}_2 + 5\% + \text{C}_3\text{H}_8 + 15\% \text{Ar}$): 1 – $t = 3$ години; 2 – $2,5$ години; 3 – 2 години від тиску реакційного газу при ПА

Аналіз отриманих кривих (рис. 5.12, 5.14) і даних таблиць 4.7, 5.9 дозволяє зробити висновок про існування деяких діапазонів температури азотування і тиску реакційного газу, при яких мікротвердість поверхневих шарів досягає максимальних значень. Для температури цей діапазон знаходиться в межах $550 - 600^\circ \text{C}$ (рис. 5.14); для тиску – в межах $200 - 230 \text{ Па}$ (рис. 5.15). Зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару зменшується, причому більш інтенсивно – після 2 години обробки (рис. 5.14, а). Товщина дифузійного шару іонно – азотованих зразків в залежності від часу дифузійного насичення може перебувати в межах від 90 до 500 мкм (рис. 5.14, б), а товщина дифузійного шару після 4 годин газового азотування при температурі 600°C склала лише 40 мкм. Мікротвердість модифікованих азотом шарів на ЕДН – покриттях становить від 5600 до 12000 МПа (рис. 5.12, 5.14, 5.15).

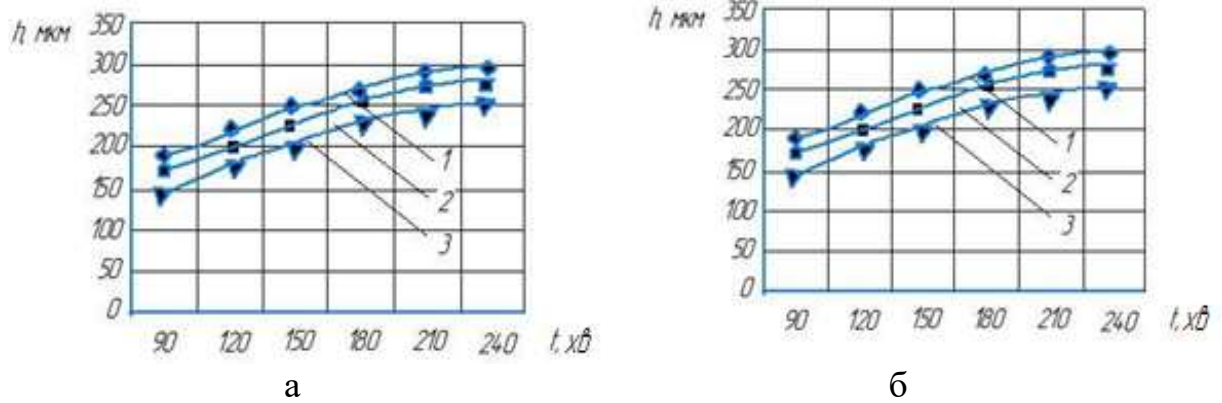


Рисунок 5.15 – Залежність мікротвердості ЕДН – покриттів (а): ($P = 200$ Па; $95\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8$): 1 – $T = 550$ ° С; 2 – $T = 500$ ° С; 3 – $T = 450$ ° С товщина дифузійного шару б): ($P = 150$ Па; $t = 3$ год.): 1 – $90\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 5\% \text{Ar}$; 2 – $95\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8$; 3 – $80\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 15\% \text{Ar}$ від часу дифузійного насичення

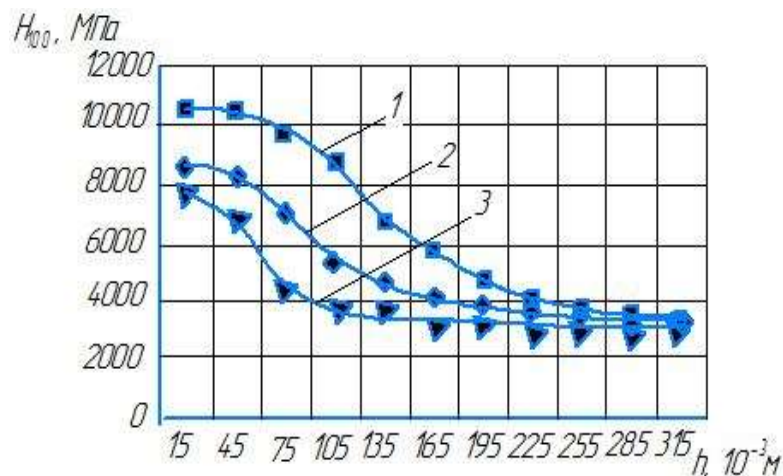


Рисунок 5.16 – Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару ($80\% \text{N}_2 + 5\% \text{C}_3\text{H}_8 + 5\% \text{Ar}$; $T = 600$ ° С; $P = 175$ Па; $t = 2,5$ год.): 1 – зразок з ЕДН після обробки ПА; 2 – зразок з ЕДН – покриттям без обробки ПА; 3 – газове азотування ($90\% \text{NH}_3 + 10\% \text{Ar}$; $T = 600$ ° С; $t = 4,0$ год)

Змінюючи температуру процесу ПА можна управляти його твердістю (табл. 5.9, рис. 5.12, а) і глибиною дифузійного шару (рис. 5.12, б). Мікротвердість модифікованого шару в результаті обробки при $670 - 720$ К досягає значень $11000 - 15900$ МПа (табл. 5.9). Підвищена дифузійна проникність ЕДН – покриттів викликана високою концентрацією в них

дефектів (вакансій, дислокацій, пор), які утворилися в умовах надшвидкої кристалізації крапель розплаву в процесі ЕДН(рис. 5.17). При цьому присутність термодинамічно стабільного легованого хромом оксиду Fe_3O_4 в вигляді плівок, які поділяють напилені частинки, ускладнює дифузне перенесення азоту від верхнього шару частинок до нижчого. Найбільша глибина ПА досягається в ЕДН – покриттях при пониженому вмісті оксидних плівок.

Основними фазами, присутніми в модифікованих азотом шарах на покриттях зі сталі мартенситного класу є нітрид $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{N}$ і Fe_4N (табл. 5.9). Після іонної обробки при температурах 720 і 770 К в азотованих шарах реєструється різке зменшення вмісту високоазотного нітриду і утворення CrN , при цьому мікротвердість шару знижується до 11300 – 12700 МПа. Крім цього відмінною рисою азотованих шарів на ЕДН – покриттях, є присутність в них частинок фази $\alpha - (\text{Fe}, \text{Cr})_8\text{N}$, а також знижений вміст в них нітридної фази Fe_4N і більш високий вміст нітриду CrN (табл. 5.10). На підставі аналізу отриманих результатів було відзначено, що найбільш високу мікротвердість, а, отже, і зносостійкість матимуть дифузійні шари, які складаються з ϵ – фаз – нітридної (Fe_3N). Тому, для отримання максимальної мікротвердості і зносостійкості ЕДН – покриттів необхідно ставити такі параметри ПА, при яких в покритті утворюються саме ці фази.

Мікротвердість дифузійних шарів на покриттях вище, ніж мікротвердість тих же шарів на сталі 40X13 (литво). Насичення азотом сталь 40X13 призводить до утворення модифікованого поверхневого шару 150 – 200 мкм і мікротвердістю 6500 – 7000 МПа (рис. 5.16). Після ПА ЕДН – покриттів зі сталі 40X13 формується композиційна структура, що представляє собою сталеву матрицю з твердими нітридами, поява яких обумовлена інтенсивною дифузією по межах ламелей. Експериментально встановлено, що чим більше температура ПА, тим менший проміжок часу необхідно витримувати між досягненням температури зміцнення ПА і початком процесу насичення поверхні азотом.

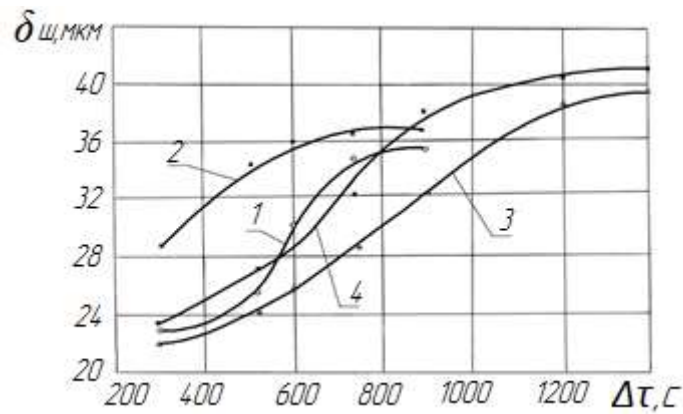


Рисунок 5.17 – Залежність товщини азотованого шару від часу витримки між нагріванням до температури ПА і початком процесу: 1,2 – покриття з сталей мартенситного класу; 3,4 – покриття з сталей аустенітного класу; 1 – 680 К; 2 – 710 К; 3 – 650 К; 4 – 680 К

Змінюючи температуру процесу, а також співвідношення потенціалів азоту можна управляти глибиною дифузійного шару і його твердістю (рис. 5.18). Після різних режимів обробки ПА ЕДН – покриттів встановлено, що збільшення температури азотування напилених покриттів зі сталей мартенситного і аустенітного класів призводить до різкого збільшення їх зносостійкості.

З аналізу результатів, наведених у табл. 5.9 видно, що обробка ЕДН – покриттів ПА сприяє збільшенню мікротвердості і глибини зміцнення поверхневих шарів напилених покриттів. У будь – якому випадку, значення мікротвердості зразків з напиленням покриттями після ПА в 2,5 – 3,0 рази більше ніж мікротвердість зразків після газового азотування (90% N₂ + 10% Ar; T = 600°C; t = 4,0 год). З аналізу кривих, наведених на рис. 5.18, видно, що ПА збільшує мікротвердість по глибині зміцнення оброблених поверхневих шарів ЕДН – покриттів.

Найбільш високу зносостійкість мають покриття при 670 – 7700 К ПА (рис. 5.18). Азотування покриттів при 500 – 520 К зі сталі мартенситного класу приводить до формування модифікованого градієнтного шару 20 – 30 мкм, не супроводжується зростанням зносостійкості поверхні стали.

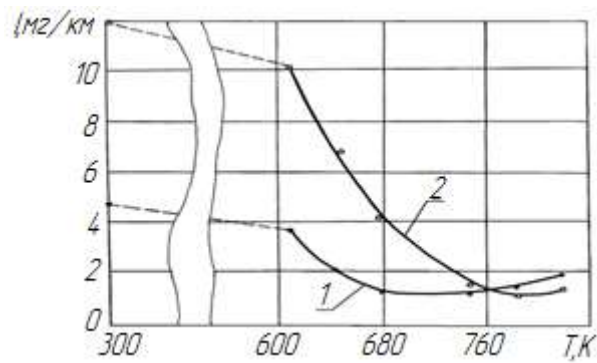


Рисунок 5.18 – Вплив температури ПА на інтенсивність зношення при сухому терті: 1 – покриття із сталей мартенситного класу; 2 – покриття із сталей аустенітного класу

При переході до більш високих температур (670, 720 і 770 К) зносостійкість покриттів істотно зростає. Підвищена зносостійкість азотованого при 7700 К напиляного шару обумовлена його великою глибиною і високим рівнем мікротвердості.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що підвищення мікротвердості ЕДН – покриттів шляхом обробки ПА позитивно впливає на зносостійкість. Вимірювання мікротвердості показало, що діаметричні властивості покриттів змінюються відповідно до триботехнічних (рис. 5.19).

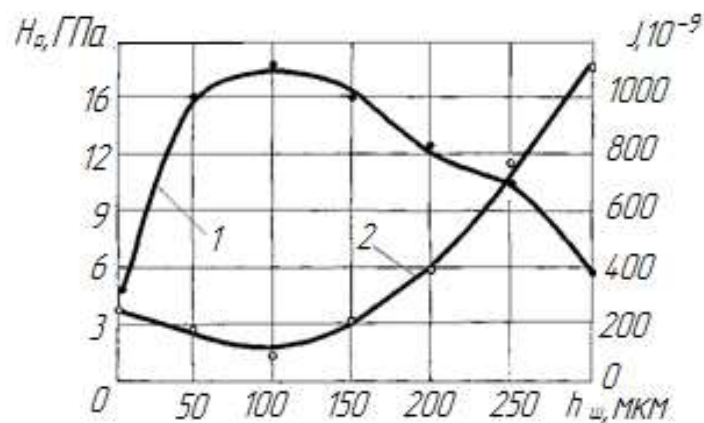


Рисунок 5.19 – Мікротвердість і зносостійкість ЕДН – покриттів з сталей мартенситного класу після їх обробки ПА: 1 – мікротвердість; 2 – інтенсивність зношування

5.5 Визначення оптимальних режимів відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів

Підвищення надійності деталей ЗТ шляхом управління властивостями відновлюваних поверхонь є кінцевою метою процесу їх відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. Розробка комбінованого методу нанесення багатофункціональних покриттів пов'язана з рішенням оптимізаційних завдань, а ефективно його використання базується на можливості управління параметрами нанесення багатофункціональних покриттів, що забезпечить максимальну міцність і довговічність відновлюваних 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 покриттів, в даний час не існує аналітичних залежностей, які дали б можливість описати і всебічно їх вивчити. Рішення завдання з побудови математичної моделі способу нанесення покриттів проводилося за такими етапами:

- формалізація завдання,
- конструювання плану експерименту, проведення експерименту,
- попередній статистичний аналіз результатів експерименту,
- побудова математичних моделей за результатами експерименту,
- аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту, формування рекомендацій (розділ 2).

У такій ситуації ефективність прийнятих рішень залежить від наявності критерію оцінки працездатності покриттів в заданих умовах експлуатації. Оцінюючи умови роботи найбільш навантажених конструктивних елементів деталей ЗТ, встановлено одночасний вплив динамічних навантажень, підвищених температур і корозійного середовища. Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні

навантаження. При систематичному їх повторенні проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування від втоми. Встановити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна за допомогою термомеханічних високочастотних випробувань на втому, а саме в необхідності визначення значення межі витривалості відновлюваного конструктивного елемента. Корозійне пошкодження істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу.

Аналіз проведених досліджень показав про відсутність висновків і рекомендацій по вибору оптимальних технологічних параметрів обробки ЕДН – покриттів ПА, які використовувалися б на практиці. Ці обставини підтверджують актуальність оптимізації технології обробки азотуванням ЕДН – покриттів.

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:

- для ЕДН – міцність зчеплення і пористість;
- для ПА напилених покриттів зносостійкість (інтенсивність зношування) і межа витривалості.

Критерії оптимізації обиралися з урахуванням наступного комплексу вимог:

- простий, зрозумілий фізичний зміст критерію та достатньо повне характеризування ним об'єкту або процесу, що досліджується;

- відповідність кожному значенню незалежних змінних одного значення відгуку;
- відтворюваність критерію, тобто збігання отриманих його значень при повторенні дослідів у номінально однакових умовах;
- вимірювання значень критерію при будь-якій комбінації обраних рівнів факторів;
- ефективність критерію як з точки зору досягнення мети, так і у статистичному відношенні.

Для математичного моделювання була визначена група керованих факторів, що впливає на величину критеріїв оптимізації (табл. 5.10, табл. 5.11).

Для ЕДН в якості керованих факторів, що впливають на адгезійну міцність, використовували напругу, дистанцію напилення, діаметр дроту, товщину покриття (табл. 5.10). Відповідно до отримання якісних покриттів і необхідних експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь адгезійна міцність повинна бути не менше 80 – 100 МПа, а пористість не перевищувати 6 – 8%.

Для ПА напилених покриттів, що впливають на інтенсивність зношування і межу витривалості, були вибрані час дифузійного насичення, тиск і склад реакційного газу, температура дифузійного насичення і експлуатаційна температура (табл. 5.11).

Таблиця 5.10 – 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 P 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	

Таблиця 5.11 – 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. 5.10, 5.11).

$$Y_1 = 3,16573 + 2,47582x_3^2 - 2,06321x_2^3 + 0,52674x_1^3 x_2 - 0,82591x_1^3 + 0,293672x_2^3 x_3^2 - 1,51418x_1^2 x_2^2 - 1,52482x_3^3 - 0,83517x_1^3 x_2^2 - 1,84718x_2 x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314 x_2^2 x_3^3 \quad (5.20)$$

де Y_1 – математична модель в кодованих значеннях для пористості напилених покриттів.

$$Y_2 = 92,5337 - 14,3728x_1 + 8,9652x_2 - 4,8754x_3 - 17,1469x_4 - 3,7426x_5 - 16,1259x_6 - 17,07341x_2x_6 - 22,2357x_3x_6 - 9,8734x_4x_6 + 1,6274x_5x_6 \quad (5.21)$$

де Y_2 – математична модель в кодованих значеннях для міцності зчеплення системи «покриття – відновлена поверхня».

$$Y_3 = 1,78685 + 5,3214x_2x_5 + 0,6543x_3^2x_6^3 - 2,1564x_5 + 1,8547x_5^2 + 1,8378x_2x_5^3 + 2,2579x_1^2x_3 + 1,5698x_3^3x_5^5 \quad (5.22)$$

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

$$Y_4 = 653,175 - 106,085x_5 + 30,317x_2^2x_5 - 15,324x_2 + 32,759x_1x_4^2 - 21,123x_4^2 \quad (5.23)$$

де Y_4 – математична модель у кодованих значеннях для межі витривалості σ_{-1} відновлених поверхонь.

Математичні моделі процесу побудовані шляхом використання методу випадкового пошуку на основі ЛПт рівномірно розподілених випадкових точок. Розрахунок моделей здійснювався за допомогою ППП ПРІАМ, теорії планування експерименту і математичної статистики. Залежності (5.20 – 5.23), перевірені на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики. Оцінка якості отриманих математичних моделей проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i з початковими експериментальними результатами. Коефіцієнти регресії визначали, користуючись методом найменших квадратів. Отримані регресійні залежності (5.20 – 5.23) використовували для оптимізації процесу ремонту деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. На основі отриманих результатів одержані наочні уявлення про геометричний образ функції відгуку і побудовані відповідні геометричні поверхні функції відгуку (рис. 5.20 – 5.21).

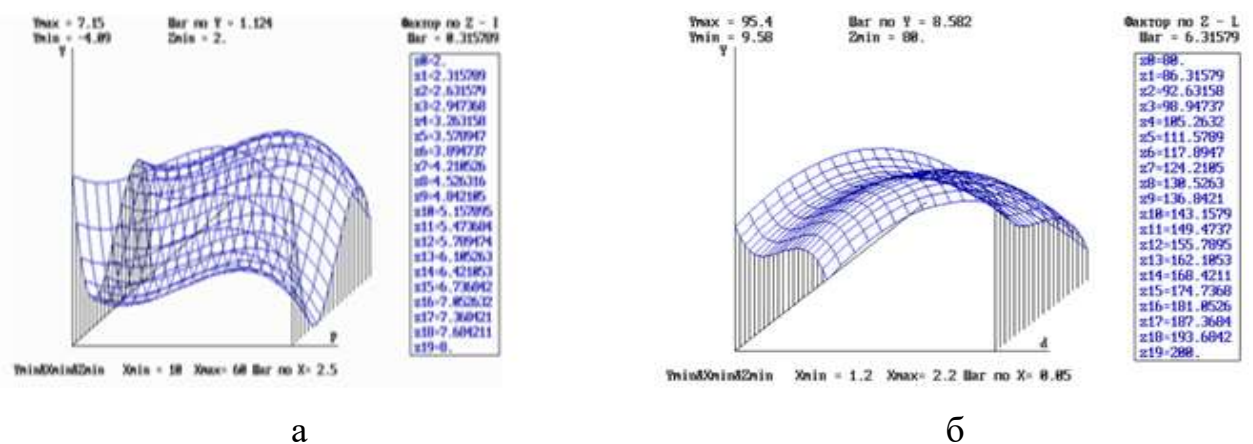


Рисунок 5.20 – Функції відгуку пористості (а) та міцності зчеплення (б) від дистанції напилання, діаметра дроту, напруги та навантаження

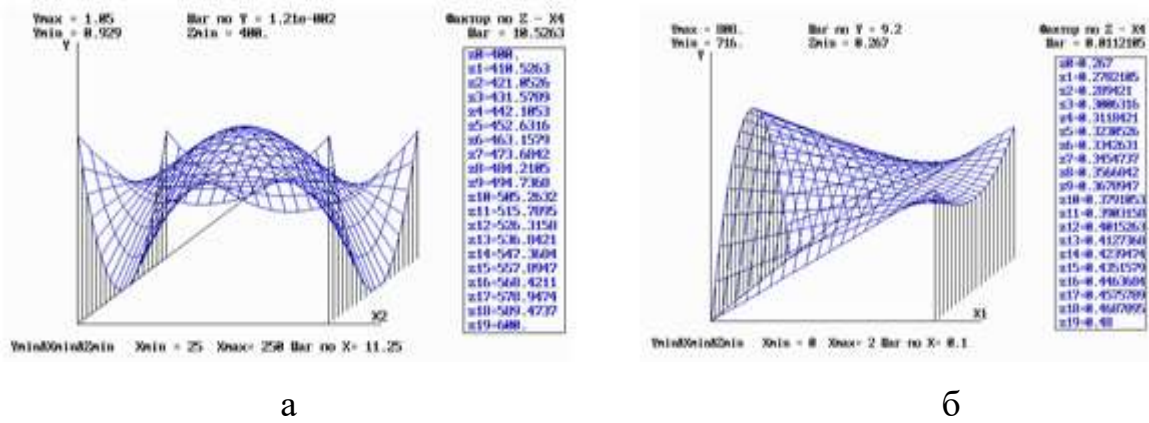


Рисунок 5.21 – Функції відгуку інтенсивності зношування та межі витривалості від часу дифузійного насичення, тиску та температури газу

Отримані математичні моделі описують залежності інтенсивності зношування, межі витривалості, міцності зчеплення і пористості від параметрів процесу нанесення багатофункціональних покриттів та можуть бути використані для оптимізації технологічного процесу відновлення деталей ЗТ. Виконані розрахунки наведені у додатку К.

Результати проведених досліджень можуть бути використані при розробленні технологічних рекомендацій по відновленню деталей вузлів ТЗ. Так, результати проведених досліджень були нами використані при відновленні зношених валів судових енергетичних установок і судових насосів. Аналіз результатів стендових випробувань показав, що відновлені поверхні деталей мали зносостійкість в 1,5 – 2 рази вище, ніж деталі без покриттів.

5.6 Висновки до розділу 5

1. Встановлено, що збільшення міцності зчеплення при нанесенні багатофункціональних покриттів комбінованим методом, відбувається не тільки за рахунок механічних сил, але і за рахунок дифузійних процесів. При ПА ЕДН – покриттів швидкість дифузії прискорюється на кілька порядків. Металографічний аналіз перехідної зони системи «покриття – відновлена

поверхня» показав, що утворюється дифузійний шар, що забезпечує міцність зчеплення 100 – 120 МПа.

2. Запропонована загальна схема вибору методів випробувань відновлених деталей з покриттями з урахуванням їх умов експлуатації. Такий підхід дозволяє визначити весь комплекс механічних характеристик відновлюваної поверхні.

3. Було визначено, що адгезійна міцність покриттів при розпиленні матеріалу покриття продуктами згорання пропано – повітряної суміші і його обробці азотуванням в імпульсному режимі в 2,0 – 2,5 рази перевищує адгезійну міцність покриттів, отриманих при розпиленні повітрям. Основний вплив на адгезію покриттів надає дистанція напилення. Для ЕДН – покриттів міцність зчеплення прямо пропорційна їх пористості. Пористість покриттів в діапазоні 5 – 14% впливає позитивно на міцність зчеплення, а її збільшення понад 14% призводить до зниження адгезії.

4. При виборі матеріалу покриттів в роботі запропоновано підхід, в основі якого лежить створення і використання фазово – структурних перетворень в покриттях при їх напиленні і обробці, і управління ними для забезпечення підвищення зносостійкості і експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь деталей ЗТ. В якості матеріалів покриттів обрані дротові сталі мартенситного і аустенітного класів. Експериментально встановлено, що в структурі покриттів при нагріванні дротяних сталей електричною дугою і їх розпилюванні надзвуковим потоком продуктів згорання пропано – повітряної суміші формується двофазна структура, яка містить аустеніт (200 – 300 HV) і певну кількість оксидів, що дозволяє отримати відновлені поверхні з високою твердістю і зносостійкістю.

5. Доведено, що обробка ПА забезпечує формування нітридів з підвищеною твердістю. Мікротвердість модифікованих ПА шарів ЕДН – покриттів становить від 5600 до 12000 МПа.

Змінюючи температуру процесу ПА можна регулювати мікротвердість і глибину дифузійного шару ЕДН – покриття. Мікротвердість

модифікованого напиленого шару ЕДН – покриття в результаті обробки при 750 – 820 К досягає значень 11000 – 12000 МПа

6. Встановлено, що максимальних значень мікротвердість досягає за умови використання суміші $90\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 5\% Ar$, а мінімальних – при суміші $80\%N_2 + 5\% C_3H_8 + 15\% Ar$, температури азотування 550 – 600°C; тиску реакційного газу 200 – 230 Па.

Зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару зменшується, причому більш інтенсивно – після 2 години обробки. Товщина дифузійного шару іонно – азотованих зразків в залежності від часу дифузійного насичення може перебувати в межах від 90 до 500 мкм. Мікротвердість модифікованих азотом шарів на ЕДН – покриттях становить від 5600 до 12000 МПа.

Змінюючи температуру процесу ПА можна управляти його твердістю і глибиною дифузійного шару. Мікротвердість модифікованого шару в результаті обробки при 670 – 720 К досягає значень 11000 – 15900 МПа.

Значення мікротвердості зразків з напиленням покриттями після ПА в 2,5 – 3,0 рази більше ніж мікротвердість зразків після газового азотування ($90\% N_2 + 10\% Ar$; $T = 600^\circ C$; $t = 4,0$ год). Найбільш високу зносостійкість мають покриття при 670 – 770 К ПА. Азотування покриттів при 500 – 520 К зі сталі мартенситного класу приводить до формування модифікованого градієнтного шару 20 – 30 мкм, не супроводжується зростанням зносостійкості поверхні сталі.

7. Для математичного моделювання була визначена група керованих факторів, що впливає на величину критеріїв оптимізації.

Отримані математичні моделі описують залежності інтенсивності зношування, межі витривалості, міцності зчеплення і пористості від параметрів процесу нанесення багатофункціональних покриттів та можуть бути використані для оптимізації технологічного процесу відновлення деталей ЗТ.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [7, 8, 13, 36, 38, 40 – 43, 48].

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ, ВІДНОВЛЕНИХ КОМБІНОВАНИМ МЕТОДОМ. РОЗРОБКА ДОСЛІДНО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ІНСТРУКЦІЙ ПО ЇЇ ВИКОРИСТАННЮ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

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.

6.1 Дослідження мікротвердості, зносостійкості і межі витривалості відновлених поверхонь

Одною з основних вимог, яким повинні задовольняти відновлювані поверхневі шари деталей ЗТ є висока твердість і зносостійкість. Виконання цієї умови стосовно до сталей можливо у випадку, коли в сталях сформована двофазна структура, яка містить метастабільний аустеніт, з твердістю 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. Режимми ЕДН дозволяють забезпечити формування в покритті великої кількості метастабільного аустеніту, який в процесі роботи трибологічних сполучень 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 700 – 1100 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 багатофункціональними 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 18XH10T формується композиційна структура, яка представляє собою сталеву матрицю із твердими нітридами, поява яких обумовлена інтенсивною дифузією по границям ламелей (конгломератів деформованих частинок дроту, що розпилюється).

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. 5.19). 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 (рис. 5.19). Для порівняння зносостійкості були випробувані зразки відновлених поверхонь з 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 40Х13 (рис. 6.1).

У процесі тертя без змащення відбувається адгезійна взаємодія матеріалу покриття з матеріалом контртіла, що супроводжується інтенсивним зносом матеріалів сполучення (рис. 6.1).

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.

Виявлена циклічність вагового зносу напилених покриттів, очевидно пов'язана з деградацією їх поверхневого шару при терті, описуваної в рамках уявлень фізичної мезомеханіки твердих тіл [243]. Зокрема, відповідно до результатів роботи [244], в процесі тертя в поверхневих шарах товщиною до 100 мкм і більше відбувається формування вихрових фрагментованих структур з утворенням мезофрагментів різного масштабу. Трансляційний і обертальний рух мезофрагментів призводить до виникнення напружень стиску і розтягу в підповерхневих шарах, зародження мікротріщин на кордонах мезофрагментів і їх відділенню у вигляді частинок зносу. При цьому процес зношування можна представити таким чином: на початкових стадіях фрикційної взаємодії (після стадії приробітки) відбувається утворення мезофрагментів різного масштабу, а також руйнування і відшаровування близько розташованих до поверхні мезофрагментів малого розміру. Це відповідає стадії сталого зношування.

Для напилених покриттів стадії сталого зносу періодично змінюються короткочасними стадіями прискореного зношування. Під час цих періодів ваговий знос покриттів різко зростає, а потім процес знову переходить в лінійну стадію сталого зносу ЕДН-покриттів та носить виражений циклічний

характер (рис. 6.1). Найбільша середня величина інтенсивності вагового зносу становила 0,41 мг/м (табл. 6.1).

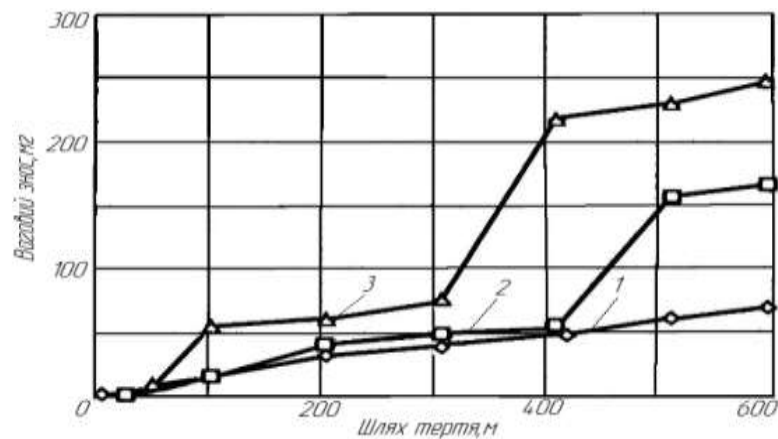


Рисунок 6.1 – Залежність вагового зносу від шляху сухого тертя:
1 – ЕДН – покриття 40Х13 + ПА; 2 – сталь 45 (литво); 3 – покриття 40Х13

Таблиця 6.1 – Значення інтенсивності зношування і коефіцієнта сухого тертя для ЕДН – покриттів і відпущеної литої сталі 40Х13 після ПА

Режим обробки	Інтенсивність зношування, мг/м	Коефіцієнт тертя
Лита сталь 40Х13	0,11	0,80 – 0,92
ЕДН – покриття	0,28	0,85 – 0,95
ЕДН – покриття	0,41	0,95 – 1,05

Інтенсивність зношування ЕДН – покриттів зі сталі 40Х13 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 40Х13 після обробки ПА підвищується в 2 і більше рази (рис. 6.2, а). Після прискорених триботехнічних випробувань зразків із азотованими напиленими покриттями з дротяної сталі 40Х13 протягом 9 годин не було виявлено помітного зношування (рис. 6.2, б).

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 $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення при інтенсивному пластичному перебігу в процесі фрикційної взаємодії. Мікротвердість шару при цьому зростає до 6500 МПа. Покриття, отримане осадженням частинок розміром 5 – 20 мкм має більш дисперсну структуру, характеризується зниженою зносостійкістю.

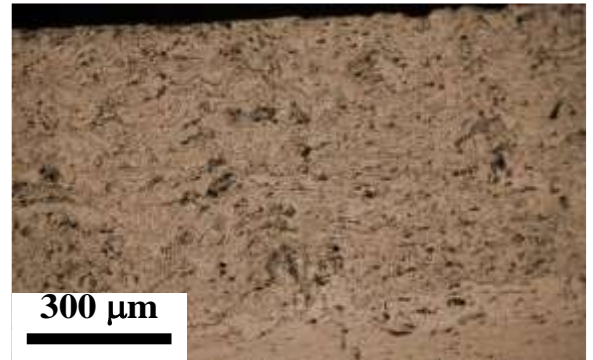
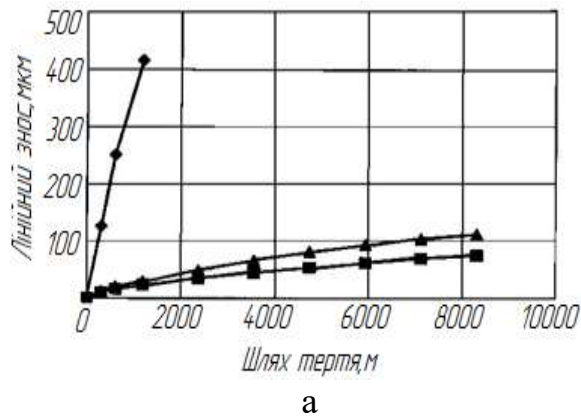


Рисунок 6.2 – Залежність лінійного зносу від шляху сухого тертя (а) та структура азотованого ЕДН – покриття після 9 годин випробувань (б):
 ◆ – ЕДН – покриття зі 40X13; ■ – ЕДН – покриття зі сталі 40X13+ПА;
 ▲ – лита сталь 45 + гартування + відпуск

У міру збільшення шляху тертя йдуть процеси формування і ротаційного руху великих мезофрагментів, захоплюючи глибокі підповерхневі шари. Після накопичення в покритті деякої критичної деформації відбувається масове відшаровування великих мезофрагментів, що супроводжується різким інтенсифікацією зносу покриття (стадія прискореного зношування). В результаті видалення великих мезофрагментів в зону фрикційної взаємодії виходять недеформовані підповерхневі шари і починається новий цикл формування мезофрагментів різного масштабу і їх подальшого відшаровування.

Оскільки руйнування покриття полегшено на кордоні між напиленням частинками, то в шарах з дисперсною структурою, що відрізняються більш

високою щільністю граничних поверхонь (режим 2), інтенсивність відшаровування великих мезофрагментів на стадії прискореного зношування може бути вище, ніж в покриттях з більш грубою структурою (режим 1).

Одночасно спостерігається поступове підвищення температури в зоні тертя. Це можна пояснити тим, що наявність пластичних частинок в зоні тертя уповільнює процеси морфологічної зміни поверхонь тертя. Найбільш стабільний процес механо – хімічного зношування спостерігається при навантаженнях до 6 МПа при швидкостях до 2 м/с і до 4 МПа - при швидкостях 24 м/с.

6.2 Дослідження корозійної стійкості відновлених поверхонь багатофункціональними покриттями

При відновленні деталей комбінованим методом на її поверхні утворюється шар покриття (рис. 6.3), 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.

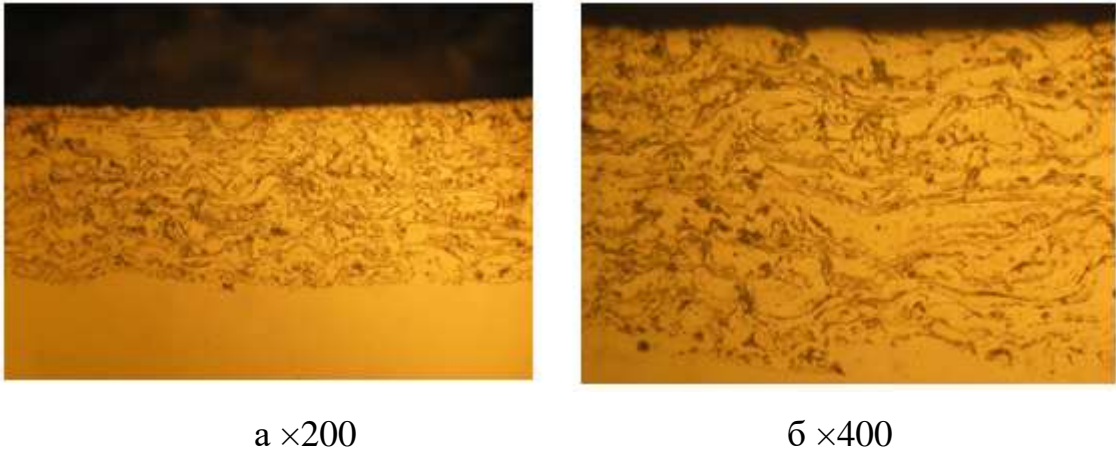


Рисунок 6.3 – Структура покриття з 40X13, отриманого електродуговим напиленням (а, б). Товщина покриття ~ 200 мкм. Мікротвердість покриття $HV_{0,05} 2680 \pm 70$ МПа

Структура відновлених поверхонь з покриттів відрізняється пористістю, яка впливає на їх корозійну стійкість. Дослідження мікротопографії поверхонь шарів ЕДН – покриттів після ПА показало, що пористість покриттів негативно позначається на їхній корозійній стійкості. Чим менше пористість, тим більше корозійна стійкість і чим більше розвинена пористість шарів, тим менше корозійна стійкість.

Візуальна оцінка стану відновленої поверхні оцінювалася за трьома критеріями: наявність продуктів корозії на поверхні після висушування поверхні, випробуваного зразка; приблизне співвідношення площ зі слідами іржі і без них; роздутість покриттів після випробувань.

Отримані дані з дослідження захисних властивостей відновлених поверхонь дозволяють судити про більш високої дисперсії значень потенціалів (щодо середнього) в момент занурення і перший, невеликий проміжок часу після занурення. На наш погляд, подібне може бути пов'язано з неоднорідністю покриттів. У перший період часу, як правило, корозійні процеси найбільш інтенсивні і найменш рівнозначні, що пов'язано з постійною зміною співвідношення площ катодних і анодних ділянок металевого матеріалу. Ми припускаємо, що в перший двадцятихвилинний проміжок часу найбільші пори покриття заповнюються агресивним

середовищем і корозійні процеси протікають переважно в них. Потім накопичується певна кількість продуктів корозії в порах, і встановлюється деяка корозійне врівноваження, що пояснюється меншим розсіюванням значень потенціалів в інтервалі варіювання, в порівнянні з першим проміжком часу. З рис. 6.4 видно, що у всіх випадках за винятком випадку №7 значення потенціалів зменшуються. Крім усереднених даних значень потенціалів, наведені значення для кожного із зразків (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Результати візуальної оцінки стану відновлених поверхонь з покриттями після випробувань

№ випробування	Кількість зразків	Індивідуально випробуваних Кількість зразків	Наявність продуктів корозії		Наявність роздутості покриття		Кількість зразків з продуктами корозії на поверхні		Кількість зразків із роздутістю покриття		Приблизне співвідношення площі із іржею/ без іржі	
			Індивідуально	Сумісно	Індивідуально	Сумісно	Індивідуально	Сумісно	Індивідуально	Сумісно	Індивідуально	Сумісно
1	4	4	+	+	-	-	4	4	0	0	1/2	1/2
2	4	4	+	+	+	+	4	4	4	4	1/5,5	1/6
3	4	4	+	+	-	-	4	4	0	0	4/1	4/1
4	4	4	+	+	-	-	4	4	0	0	6/1	6/1
5	4	4	+	+	-	-	4	4	0	0	1/1	1/1
6	4	4	+	+	+	+	4	4	4	4	1/1,4	1/1,4
7	4	4	-	-	-	-	0	0	0	0	1/1,4	1/1,4
8	4	4	+	+	-	-	4	4	0	0	4/1	4/1

Видно, що після місячного перебування зразка експериментального валу в середовищі значення щільності струму зменшується. Цей факт збільшує ступінь об'єктивності припущення на предмет накопичення продуктів корозії під покриттям.

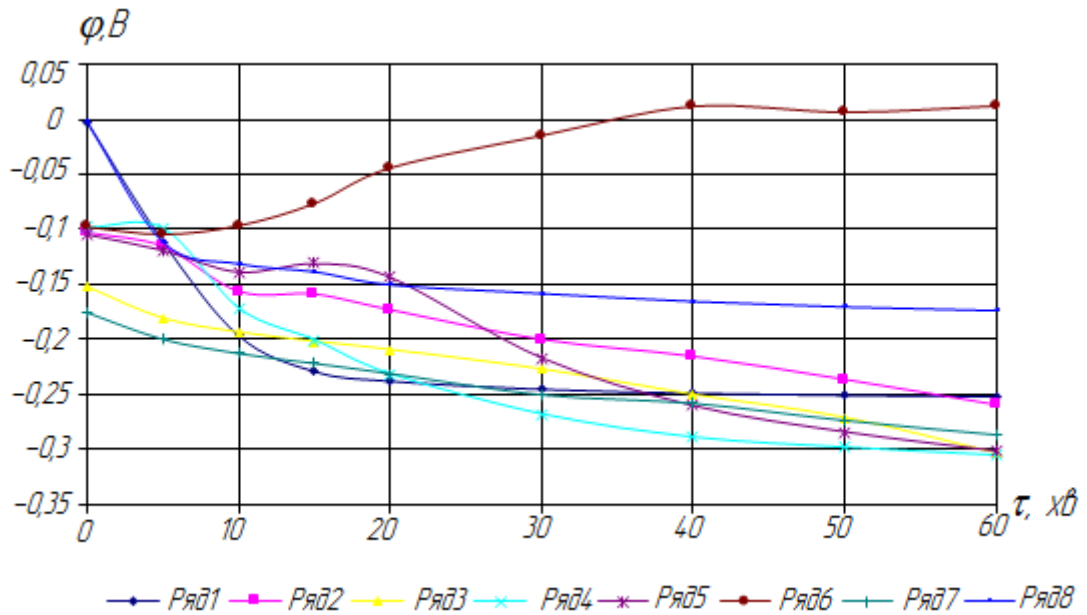


Рисунок 6.4 – Результати потенціодінамічних досліджень: 1 – з моменту занурення (ряд 1); 2 – через годину після занурення (ряд 2); 3 – через чотири години після занурення (ряд 3); 4 – через добу після занурення (ряд 4); 5 – через 4 доби після занурення (ряд 5); 6 – через тиждень після занурення (ряд 6); 7 – через 2 тижні після занурення (ряд 7); 8 – через місяць після занурення (ряд 8)

Випробуванню підлягали вали судових насосів СН ВКС 2/26, виготовлені зі сталі 45 ГОСТ 1050-88 (виконання А) або сталь 95Х18 ГОСТ 5632 – 72 (виконання Б, К), відновлені комбінованим методом нанесення покриттів. Результати візуальних спостережень зведені в табл. 6.1. В результаті випробувань зроблений наступний висновок: сенсорний аналіз стану відновленої поверхні зразків валу з покриттям після випробувань дозволяє припускати, що через місяць після контакту із морською водою (використовується соляний розчин) співвідношення поверхні з іржею в чотири рази більше поверхні без іржі. Встановлено зниження електрохімічного потенціалу на поверхні розділу «відновлена поверхня з покриттям – вал» в 3 – 5 рази.

Кінцева мета виконаних досліджень – можливості забезпечення максимального ресурсу відновлених деталей ЗТ шляхом розробки

технологічного процесу відновлення їх поверхонь комбінованим методом нанесення покриттів і практичних рекомендацій щодо цього застосування при відновленні деталей ЗТ (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення), її апробація в лабораторних і виробничих умовах.

6.3 Розробка ТП дослідно – експериментальної технології відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покрит

6.3.1 Загальні положення про ТП ремонту деталей ЗТ

Відсутність науково обґрунтованих рекомендацій для відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення покриттів викликало необхідність проведення досліджень цього процесу та оптимізації його параметрів, які були виконані в розділах 1 – 5 дисертаційної роботи. На підставі результатів експериментальних і теоретичних досліджень була розроблена технологія відновлення поверхонь деталей ЗТ електродуговими покриттями з подальшим їх азотуванням і попередньою електроіскровою обробкою та запропоновані практичні рекомендації щодо її використання в ремонтному виробництві на підприємствах України.

Кінцевою метою розробки різних технологічних процесів ремонту деталей є підвищення їх надійності, довговічності і ресурсу шляхом управління властивостями їх відновлюваних поверхонь [39, 46].

Основним завданням управління властивостями відновлюваних поверхонь деталей ЗТ багатофункціональними покриттями є забезпечення необхідного хімічного складу, структури і фазового складу відновлюваних поверхонь, їх твердості, шорсткості і ін.

При ремонті широкої номенклатури деталей ЗТ шляхом їх відновлення зміцнюючими захисними покриттями доцільно використовувати підхід, який складається з наступних етапів:

– визначення умов роботи деталей у вузлі і основні властивості їх робочих поверхонь, що відповідають умовам експлуатації;

- вибір матеріалів для покриттів;
- визначення типу апаратури і режимів її роботи, що забезпечують отримання необхідних властивостей відновлених поверхонь деталей;
- проведення комплексу досліджень основних властивостей відновлених покриттів;
- відновлення експериментальної партії деталей і їх випробування.

Аналіз надійності [46] деталей ЗТ повинен містити систематизовані матеріали про повторні, небезпечні відмови, несправності і пошкодження (розділ 1, п.п. 1.2, додаток Б). При виявленні небезпечних відмов і несправностей СТ необхідно провести комплекс заходів, що мають на меті: встановити причини дефекту; визначити технологічне рішення щодо усунення дефекту; здійснити профілактичний огляд СТ.

Основу експлуатаційного забезпечення надійності ЗТ становить (ТО і Р) технічне обслуговування та ремонт.

Ремонт ЗТ включає відновлення ресурсу ЗТ і зміст процесу ремонту ЗТ складається з:

- діагностики виявлення пошкоджень і несправностей (відмов) деталей ЗТ і визначення працездатності деталей в цілому;

- ремонт – відновлення справності або працездатності деталі [46].

Ремонт ЗТ становить основу експлуатаційного забезпечення її надійності, дозволяє підвищити ресурс її деталей і включає комплекс операцій по відновленню їх працездатності (справності). Працездатність деталей характеризується структурними параметрами (фізико – механічні властивості матеріалів деталей і їх зносом) і діагностичними параметрами (температурою, вібраціями, тиском і ін.) [24, 37, 39,46, 47]. Технологічний процес ремонту деталей ЗТ включає: розбірні і розбірно – мийні роботи; мийно – очисні роботи; очистку; контроль і дефектоскопію; сортування деталей [26]. Розбірно – очисні роботи, дефектоскопія деталей обов'язкові операції технологічного процесу ремонту [47].

При технологічній підготовці ремонту деталі для кожного її елемента визначають значення експлуатаційних властивостей, які забезпечують нормативну після ремонту її напрацювання. Якщо керівництво по ремонту відповідної деталі не містить такі властивості або їх значення не задовольняють наведеним умові, то проводять наукову підготовку з визначення якої бракує сукупності властивостей і їх значень.

Основним джерелом економічної ефективності ремонту є відновлення деталей [47], яке дозволяє зберегти велику кількість матеріалів, енергії та праці. Відновлення зношених деталей включає технологічні процеси відновлення їх справного стану і ресурсу шляхом повернення їм втраченої частини матеріалу через зношування і (або) доведення нормативних значень їх властивостей, що змінилися за час їх експлуатації [47]. До нормативних значень доводять наступні показники: зносостійкість, міцність, розміри і шорсткість робочих поверхонь; значення маси деталі і її розподіл щодо осей обертання і інерції; корозійну стійкість; втомну міцність. Кожна властивість є однією з характеристик якості відновленої деталі.

6.3.2 Загальної схема дослідно – експериментальної технології відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів

Відновлюючи деталь, ми відновлюємо її функціональні властивості (відновлюємо справність або працездатність) і ресурсні властивості (відновлюємо технічний ресурс до вимог нормативно-технічної документації) [47]. При відновленні деталі забезпечуються нормативні значення її функціональних і ресурсних показників. Функціональні показники характеризують справність деталі, а ресурсні – ступінь відновлення технічного ресурсу [47].

Відновлення є окремо функціонуючу систему, в рамках якої виконуються наступні процеси: миття і очищення деталей, оцінка стану

деталей (дефектація), проектування технологічного процесу (ТП) відновлення, безпосереднє відновлення деталей [24, 26, 37, 47].

У структурному відношенні ТП відновлення деталей ЗТ можна розглядати як певним чином пов'язану сукупність способів усунення їх дефектів, пошкоджень, відмов (рис. 6. 5).

ТП відновлення деталей електродуговими покриттями складається з наступних операцій: миття і очищення деталі; вхідний контроль (дефектація) деталі; попередня механічна обробка; електроіскрова обробка; контроль поверхонь після ЕІЛ; ізоляція перед напиленням; електродугове напилення; контроль відновлених поверхонь з покриттями; МО відновлених поверхонь із ЕДН – покриттями по необхідності; обробка відновлених поверхонь з напиленими покриттями ПА; остаточний контроль відновлених деталей; консервація деталей для зберігання.

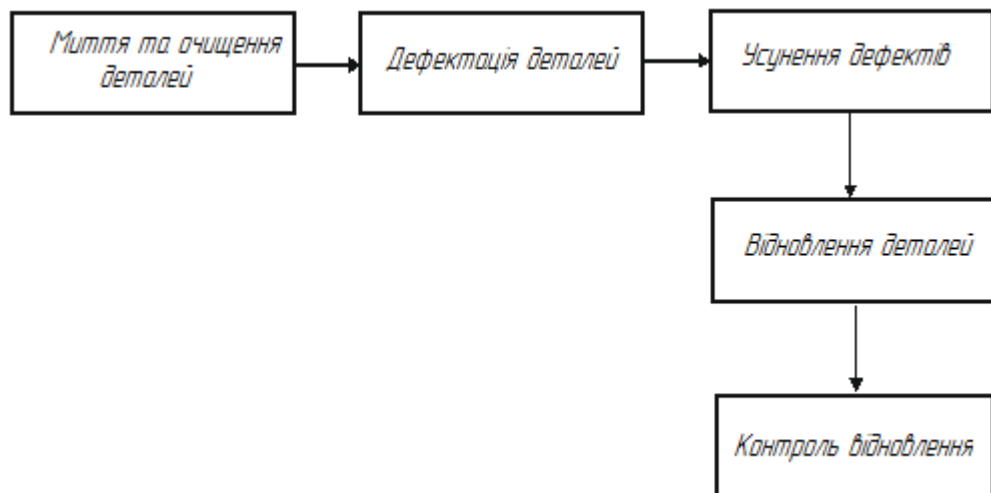


Рисунок 6.5 – Загальна схема ТП відновлення деталей ЗТ

6.3.3 Обробка відновлюваних поверхонь під напилення ЕІЛ

Для ЕІЛ відновлених поверхонь використовуються установки електроіскрового легування (розділ 3, п.п.3.2.2, додаток Ж), а також звичайні зварювальні трансформатори. Максимальна напруга на вторинній обмотці трансформатора 9В, ток – 340 А.

В процесі ЕІЛ рекомендується формувати шорсткість поверхні з висотою мікровиступів, рівних три чверті діаметра частинок матеріалу, що напилюється ($R_a = 5 - 10$). При цьому відбувається сприятливий розподіл напружень по перерізу деталі і збільшується міцність зчеплення. Таким чином, якість підготовки відновлюваної поверхні ЕІЛ визначається ступенем шорсткості.

6.3.4 Нанесення електродугових покриттів з дротяних сталей

Проміжок часу між підготовкою поверхні і напиленням повинен бути по можливості мінімальним, особливо після ЕІЛ, тому що шорстка активна поверхня легко окислюється. В середньому, час перерви не повинна перевищувати 3 – х годин. Не пізніше, ніж 2 години після ЕІЛ, підготовлену до напилення деталь необхідно перемістити до установки для електродугового напилення і закріпити.

Для захисту поверхонь деталі від потрапляння на них частинок напилюваного матеріалу використовують екрани і накладки з металу, пасти і інших негорючих матеріалів. Для невеликої за площею поверхнею напилення використовують спеціальні екрани з краями, загнутими назустріч руху частинок металу. Екрани встановлюють на відстані не більше 50 мм від поверхні напилення. Іншим способом ізоляції є нанесення антиадгезійного складу, що містить шелак (20 – 50%), хлорид амонію (35 – 45%), етиловий спирт (інше). Хлорид амонію при контактуванні з частинками матеріалу, що напилюється випаровується. Гази забирають частки розплавленого металу покриття на захищеній ділянці товщиною 0,3 – 0,5 мм. Шелак деструктуючий при контакті з розплавленими частками напилюваного матеріалу перешкоджає формуванню покриття. Для запобігання налипанню напилюваного металу на ділянках деталі, що не підлягають відновленню покривають тонким шаром захисної пасти наступного складу (мас. %): графіт – 10, крейда – 20, мило – 70. Зазначена суміш розбавляється водою в співвідношенні 3: 1 і наноситься на поверхню. Після висихання пасти

проводять напилення покриття. Зазначена паста легко видаляється металевою щіткою після напилення. Особливу увагу слід приділяти підготовці шпонкових канавок. Підготовка валів зі шпонковими канавками і мастильними отворами докладно викладена в додатку Л.

Нанесення основного покриття. Щоб вибрати оптимальний режим нанесення електродугових покриттів, необхідно знати фізико – хімічні процеси, які в ньому відбуваються в процесі його формування на відновлюваній поверхні деталі ЗТ.

Схема нанесення покриття складається з наступних елементів: подачі металу до місця плавлення; нагріву металу до розплавлення; диспергування металу; надання металевим частинкам значній швидкості; удар прискорених частинок о поверхню деталі, їх деформація і закріплення; охолодження частинок, які закріпилися і всього покриття в цілому. В результаті експериментальних і теоретичних досліджень встановлено оптимальні режими процесу відновлення електродуговими покриттями, виконуючи які можна отримати рівномірне і якісне покриття. Для отримання оптимальних результатів відновлення ЕДН необхідно працювати при тиску стисненого повітря 0,45 – 0,6 МПа і тиску пропан –бутану 0,25 – 0,4 МПа. Напряга на дузі встановлюється в залежності від матеріалу покриття (табл. 6.3). Робоча напряга дуги в межах 35 – 40 В є максимально можливим з економічної точки зору, так як зі збільшенням потужності дуги втрати електродного металу за рахунок випаровування можуть досягати 20%. Робочий струм дуги автоматично встановлюється в залежності від швидкості подачі дротів. Швидкість подачі дротів встановлюється максимально можливою при даній напрузі дуги при забезпеченні стабільного плавлення електродів.

Тиск і витрата стисненого повітря і пропану, дистанція напилення встановлюється на підставі результатів досліджень, представлених в розділах 2, 3 і 4. Кут напилення має дорівнювати 90 °, так як при відхиленні від нього зростає пористість покриття, зменшується коефіцієнт використання металу і міцність зчеплення з основою.

Таблиця 6.3 – Напруга на дузі в залежності від матеріалу покриття

Матеріал, що використовується	Напруга, В	Діаметр дроту, мм	Максимальна продуктивність, кг/год	Струм, А
Цинк	18 – 24	1,6	6,40	110 – 130
Алюміній	22 – 28	2,0	10,2	140 – 200
Сталь	26 – 32	2,0	6,60	140 – 300
Мідь	34 – 38	2,0	18,6	180 – 400
Бронза – латунь	30 – 34	2,0	21,2	260 – 360

Швидкість обертання деталі і подовжня подача електродугового апарату вибираються на підставі рекомендацій для електродугового напилення (додаток Д, Л).

Поряд з робочими параметрами застосовуваної апаратури, на процес відновлення електродуговим напиленням впливають відстань між соплом апарату і відновлюваною поверхнею, продуктивність електродугового апарату, ступінь розпилу дроту, кут розпилу, тривалість перерв між напиленням окремих шарів, температура основи і покриття, швидкість переміщення апарата. Оптимальний режим напилення наведено в табл 6.4.

Порядок нанесення електродугових покриттів наступний: включити обертаючий пристрій з закріпленим зразком; включити подачу повітря на електродуговий апарат; включити живлення дуги і подачу дроту (вимикання проводиться в зворотному порядку); включити електродуговий апарат і напилити зразок (рис. 6.6).

Таблиця 6.4 – Оптимальні параметри ЕДН сталевих покриттів

Тиск і витрата стисненого повітря і	Значення параметру
Робоча напруга дуги, В	35 – 40
Тиск стисненого повітря, МПа	0,45
Витрата стисненого повітря, м ³ /хв	1,0
Тиск пропану, МПа	0,35
Витрата пропану, м ³ /хв	0,04
Дистанція напилення, мм	180 – 220
Швидкість подачі дротів, м/хв	2,5
Швидкість обертання деталі, хв ⁻¹	15 – 20
Повздожня подача апарату, мм/об	110

Товщина напиляного шару за один прохід має становити 0,1 – 0,25 мм. При більшій товщині напиляного шару можливі перегріву і відшаровування покриття. Після напилення трьох шарів покриття, провести контроль товщини шару вимірами в трьох перетинах, виконуючи по три виміри в кожному перетині. Товщина покриття визначається за формулою [76]:

$$h = \frac{D - d}{2} + b \quad (6.1)$$

де D – діаметр деталі за кресленням, мм; d – діаметр деталі після попередньої механічної обробки; b – припуск на сторону для механічної обробки після напилення покриття



Рисунок 6.6 – Нанесення електродугових покриттів

Перед напиленням необхідно перевірити запас дроту, наявність і кількість пропану і стисненого повітря, щоб не довелося переривати процес, що допускається тільки у виняткових випадках. Після закінчення процесу напилення за допомогою металевої щітки, молотка і зубила видаляються металеві корки з невідновлювальних місць деталі.

Якість покриття і ефективність процесу його формування багато в чому залежать від обраного режиму роботи обладнання для ЕДН, його стану, яке потрібно перевірити до початку нанесення покриття. Режим роботи апарату для електродугового напилення встановлюється оператором в залежності від

джерела електричного живлення, що застосовується, матеріалу покриття, діаметра дроту, тиску стисненого повітря і пропан – бутану. Вибір обладнання для відновлення тим чи іншим способом обумовлюється економічними міркуваннями. Від вартості обладнання в значній мірі залежить вартість тих деталей, які необхідно відновлювати.

Для реалізації процесу ЕДН використовувалося обладнання (рис. 6.7), що включає апарат для електродугового напилення ЕДН – 10 (додаток Д) у вигляді розпилювальної головки (рис. 6.7), джерела живлення електричної дуги (рис. 6.7), пульт управління (рис. 6.7), газового блоку, комплекту шлангів і джгутів. Живлення установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Апарат джерела постійного струму з «жорсткою» вольт – амперною характеристикою ВДУ – 506 (рис. 6.7, а, додаток В), комплектується сполучними кабелями з комутуючою коробкою і пультом управління (рис. 6.7, б). Джерело струму «ВДУ – 506» повинно розташовуватися на відстані 3 – 4 м від електродуги апарату (рис. 6.7, а). Блок управління апарату для електродугового напилення призначений для регулювання швидкості подачі дроту і підпалу суміші повітря з горючим газом. Будова і принципи роботи блоку управління апарату для електродугового напилення представлені в технічному паспорті на установку для електродугового напилення (додатку В). Блок забезпечення призначений для здійснення подачі охолоджуючого і утворюючого суміш стисненого повітря, зварювального струму і високовольтної напруги до електродугового апарату. У блоці забезпечення розміщена котушка запалювання, і гніздо підключення високовольтного проводу підпалу суміші. Склад блоку забезпечення описаний в додатку Д.

Загальний вигляд апарату для електродугового напилення представлений на рис. 6.8 і в технічному паспорті на установку для електродугового напилення (рис. Д.1, додатку Д). Розпилювальна головка служить для формування струменя розплавленого металу і складається з камери згоряння, напрямного вузла підводу струму (додаток В).



Рисунок 6.7 – Апарат для електродугового напилення ЕДН – 10 з джерелом постійного струму ВДУ-506, з дротами і комутуючою коробкою (а), і пультом управління (б).

Стиснене повітря і горючий газ подаються в камеру згоряння. Камера згоряння служить для отримання високошвидкісного струменя газів продуктів згоряння. Змішування горючого газу з повітрям відбувається в змішувальному пристрої (додаток Д). Підпал суміші, здійснюється за допомогою високовольтного розряду, що відбувається між електродами свічки запалювання. Охолодження камери згоряння повітряне. Притиснення дротів до роликів подачі здійснюється притискними роликками (додаток Д).



Рисунок 6.8 – Загальний вигляд електродугового апарату ЕДН – 10

Характеристика електродугового апарату представлена в табл. 6.5. До допоміжного обладнання для нанесення електродугових покриттів відносяться:

- касети з електродним дротом;
- пристрій для установки касет, що виключає можливість зіткнення дротів при розмотування щоб уникнути короткого замикання;
- мережу стисненого повітря $\leq 0,45 - 0,6$ МПа, стиснене повітря 3 – го класу забрудненості, блок подачі стисненого повітря;
- мережу (балон) пропану (рис. 6.5, а). Газовий блок приєднують до апарата для ЕДН, а пульт управління до газового блоку.

Схема з'єднання електродугового апарату з джерелом струму, газовим блоком і блоком управління, порядок роботи установки для ЕДН і зарядки дроту в апарат представлені в додатку Д.

Таблиця 6.5 – Технічна характеристика апарату для електродугового методу нанесення покриттів ЕДН-10

Параметр	Показник
Напруга, В	8 – 40
Сила струму, А	80 – 380 А
Номінальна потужність електродвигуна приводу подачі дроту, Вт	0,09
Потужність дуги, кВт	5 – 20
Температура часток матеріалу, К	110 – 6100±200
Робочий тиск газів, МПа	0,3 – 0,45
пропан	0,45 – 0,8
повітря	
Витрата повітря при 0,6 МПа, м ³ / год	не більше 60
Витрата пропан – бутану, м ³ /хв	не більше 0,011
Швидкість подачі дроту, м/с	0,05 – 0,63
Дистанція напилення, мм	60 – 150
Продуктивність розпилення матеріалу при дроті діаметром 2 мм по сталі, кг/год	18,4
Швидкість переміщення плями напилення, м/с	0,5 – 0,8
Кут зустрічі потоку частинок з поверхнею напилення, ⁰	45 – 90
Коефіцієнт використання напилюваного матеріалу	0,8 – 0,85
Відстань від сопла до напилюваної поверхні, мм	150 – 180
Діаметр дроту, мм	1,6 – 2,0
Частота обертання валу, хв ⁻¹	до 60

Установка для електродугового напилення ЕДН – 10 дозволяє відновлювати зношені поверхні, наносити зносостійкі і інші покриття. Вона використовується для відновлення шийок колінчастих валів, компресорів, насосів; посадочних місць під підшипники на валах і в корпусах.

До дротів, що використовуються для відновлення деталей ЕДН – покриттями, висуваються наступні вимоги:

- поверхню дроту повинна бути гладкою (рівною) без слідів корозії, фарбування і будь – яких забруднень;
- дріт не повинна мати перегинів. Вм'ятини і перегини дроту повинні бути усунені;
- рекомендується застосовувати тільки дріт, намотаний на котушки;
- дріт повинна вільно тікати з зовнішнього боку котушки;
- перед застосуванням дріт необхідно очистити і просушити.

Очищають дріт від мастила відпалом при температурі 800 – 850 ° С протягом 11,5 години, гальванічним травленням або в розчині сірчаної кислоти (70 – 80 г на 1 л води) при температурі 70 – 80 ° С протягом 1 години.

Режим просушування: нагрів до 150 ° С зі швидкістю 50 – 100 ° С/год., 2 год витримки, охолодження – на повітрі.

6.3.6 Механічна обробка поверхонь деталей ЗТ

Обробка поверхонь, відновлених ЕДН – покриттями, через особливості їх структури, вимагає виконання вимог, розглянутих в методичних рекомендаціях (додаток Л).

Покриття можна піддавати практично всім видам механічної обробки: свердлінню, точінню, фрезеруванню, шліфуванню.

Одне з основних умов успішної механічної обробки покриттів – зусилля, що виникають при різанні не повинні бути спрямовані на відрив шару покриття від відновлюваної поверхні, шар завжди повинен притискатися до основи.

Структурні особливості і фазовий склад покриттів визначають вибір методів і режимів їх механічної обробки, відмінних від тих, що застосовуються при виготовленні деталей з однорідного металу. Знання властивостей електродугових покриттів дозволяє виконувати їх механічну обробку з мінімально можливими затратами. На властивості покриттів в значній мірі впливають навіть невеликі зміни режимів напилення, наявність забруднень в робочих газах тощо, тому режими механічної обробки повинні коректуватися в кожному конкретному випадку. Припуск напиляного шару на механічну обробку становить від 1 до 2 мм, в залежності від товщини покриття (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Припуск на механічну обробку шліфуванням покриття

Діаметр деталі, мм	Припуск, мм
до 30	0,35 – 0,4
30 – 50	0,4 – 0,45
50 – 70	0,45 – 0,5
70 – 100	0,5 – 0,55
100 – 120	0,55 – 0,65
120 – 150 і більше	0,65 – 0,75

Через усадку напиляного матеріалу шліфування здійснюють після 48 годин. Вибір режиму механічної обробки поверхонь, відновлених ЕДН, здійснюватися за методичними рекомендаціями (додаток Л).

Низьковуглецеві сталі зазвичай обробляються точінням або фрезеруванням, якщо твердість при цьому не перевищує 40 – 42 НРС. За рекомендаціями швидкість різання при чорновій обробці бажано вибирати рівний 30 – 38 м/хв при подачі 0,15 мм/об. При цьому глибина різання не повинна перевищувати 0,1 мм. При чистовій обробці ЕДН – покриттів відповідно: $V = 38 - 53$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об.

Необхідний остаточний розмір поверхні формується після фінішної обробки, як правило, шліфування. Дана операція проводиться в разі

необхідності. Режими цієї операції слід підбирати такими, щоб вони не привели до викришування або розтріскування покриття. Шліфування ведуть колами з карбиду кремнію зеленого або електрокорунду, наприклад, типу 24А 60ПС23.К5 зернистістю 150 – 200 мкм, при швидкості шліфування 35 – 48 м/с, подачею 0,06 – 0,08 мм/об і глибині різання < 0,1 мм.

Шліфування служить остаточною обробкою для покриттів. При шліфуванні покриттів відбувається швидке забруднення кола. Для поліпшення оброблюваності слід застосовувати мастильно – охолоджуючі рідини.

Чорнове шліфування поверхонь, відновлених ЕДН – покриттями, що мають твердість вище 60 HRC, рекомендується проводити при наступних режимах: швидкість кола 30 – 35 м/с; поздовжня подача 1 – 3 м/хв; глибина шліфування не більше 0,01 – 0,03 мм. Матеріал шліфувального круга АСК; АСВ зернистістю 250/200. Шліфування проводити абразивним кругом з електрокорунду або карбиду кремнію середньої твердості (СМ – 1, СМ – 2, СТ, СТ – 1, СТ – 2). Режими шліфування: глибина при чорновому шліфуванні – 0,1 – 0,5 мм; глибина при чистовому шліфуванні 0,01 – 0,03 мм. При шліфуванні застосовують емульсію (Амінол, МХО-101, ПВК). Шорсткість обробленої поверхні після шліфування повинна бути не більше R_a 0,63.

6.3.7 Рекомендації по організації ділянки відновлення деталей ЗТ

Ділянка відновлення повинен займати окреме приміщення. На підприємствах вибір приміщення для виконання робіт по відновленню деталей ЗТ залежить від обсягу робіт, розміру і конфігурації виробів, продуктивності та інших факторів. Процес напилення покриттів супроводжується виділенням металевого пилу, шкідливих газів, газів металів, інтенсивного світлового і звукового випромінювання. Тому слід прагнути до розміщення ділянки в ізольованому приміщенні. Категорично забороняється розміщувати ділянки в підвальних приміщеннях. Приміщення

ділянки для відновлення деталей покриттями має бути розташоване на першому поверсі і розділене на дві основні зони – технологічну і допоміжну. Технологічна частина ділянки обов'язково повинна мати стелю і стіни, покриті звукоізолюючим покриттям.

Деталі на ділянку і з ділянки транспортуються за допомогою електрокара. Знімання і установка деталей на електрокар, на стелажі і технологічне обладнання здійснюється підвісною кран – балкою. Після попереднього шліфування деталей надходить на стелаж ділянки. Потім направляється в мийну машину, а після сушиться і обпалюється в печі. Після охолодження, деталь прямує до установки для ЕІЛ, де напилюємі поверхні піддаються ЕІЛ. Після чого деталь встановлюється на токарний верстат, і напилюється покриття електродуговим апаратом (рис. 6.8).

Для підключення блоку управління електродугового апарату на ділянці необхідна мережа - $U = 220$ В. Для підключення випрямляча на ділянці необхідна мережа - $U = 380$ В, 3 фази, N - не менше 10 кВт. Випрямляч зварювальний – джерело струму з жорсткою вольт – амперної характеристикою (типу ВДУ 506) необхідний для запалювання дуги між дротами (рис. 6.9). Основна вимога до джерела струму полягає в тому, що він повинен забезпечити можливість плавного регулювання напруги на дузі від 17 до 40 В. При цьому нахил статичної вольт – амперної характеристики джерела в робочій точці повинен бути не більше 0,2 В/А по абсолютній величині. Випрямляч повинен бути забезпечений зварювальними кабелями перерізом не менше 16 мм² з плоскими мідними наконечниками. Ширина плоскої частини наконечника - не більше 16 мм. Діаметр приєднувального отвору в плоскій частині наконечника 8,2 мм.

Процес нанесення покриттів можна здійснювати тільки при наявності вентиляції, що здійснює відсмоктування пилу. Для відсмоктування металевого пилу і газів рекомендується використовувати вентилятори відцентрового типу. Швидкість руху потоку в приймальному перерізі пристрою для витяжної вентиляції повинна бути не менше 1,5 м/с.

Продуктивність вентилятора повинна бути 3000 – 4000 м³/год. Приймальний пристрій витяжної вентиляції рекомендується виконувати у вигляді короба, що забезпечує видалення всіх шкідливих продуктів згоряння робочих газів. Трубопроводи витяжної вентиляції повинні бути обладнані пристроями для збору і періодичного очищення від пилу, що накопичується. У тих випадках, коли об'єм повітря, що відсмоктується в годину перевищує шестикратний об'єм приміщення, необхідно обладнати його припливною вентиляцією. Кількість свіжого повітря, що подається має перевищувати на 10% об'єм повітря, що відсмоктується. Потік повітря, що подається необхідно розсіювати. Повітря, що подається повинно бути чистим і сухим, а в зимовий час - підігріватися. Для обігріву приміщення рекомендується поєднувати калориферне і водяне опалення. Температура повітря в приміщенні не повинна бути нижче + 18⁰С, вологість – не більше 80%. Освітленість повинна бути не менше 200 лк, висота стелі не менше 3 м. Все технологічне обладнання ділянки розташовується уздовж стін (рис. 6.9).



Рисунок 6.9 – Ділянка відновлення деталей ЗТ електродуговим методом нанесення покриттів

Ділянка відновлення повинен мати підвід стисненого повітря по трубі діаметром не менше 3/4 дюйма. Тиск повітря в магістралі повинен бути не менше 0,55 МПа при витраті 2,5 м³/хв. На виході труби повинен бути встановлений кульовий кран, до якого приєднується регулятор тиску (клапан

$D_y = 16$ мм, $P_{\text{ном}} = 1$ МПа, $Q_{\text{ном}} = 1,6$ м³/хв), оснащений манометром зі шкалою від 0 до 1,0 МПа. Від регулятора тиску до обладнання стиснене повітря підводиться через гумово – тканинний рукав – шланг з внутрішнім діаметром 14 мм. Тиск стисненого повітря в мережі перед регулятором тиску - не менше 0,6 МПа при витраті - не менше 1,5 – 2,5 м³ / хв.

Наявність води і масла в стислому повітрі не допускається. У стислому повітрі допускається до 5 мг/м³ твердих частинок, до 1900 мг/м³ парів вологи, до 5 мг/м³ масла. Для очищення повітря від масла і води служить спеціальний відокремлювач марки ДВ 4116.

Підведення стисненого повітря до електродугового апарату здійснюється через муфтовий латунний кран.

Для формування розпилювального факела, необхідний газ - пропан в балонах по 50 л технічний марки СПБТ, місткістю 50 дм³, об'ємом газу 12000 дм³, масою 22 кг, тиском газу 1,6 МПа. Балон повинен бути оснащений пропановим редуктором з манометром. Редуктор типорозміру БПО5 марки ДГШ165 з максимальною витратою газу 5 м³год., тиском газу на вході 4 МПа і на виході 2,5 МПа служить для регулювання тиску пропан – бутану на виході з балона. Від пропанового редуктора до обладнання газ підводиться через резино – тканинний шланг типу 1ВП012 з внутрішнім діаметром 6 мм.

6.4 Рекомендації по практичному використанню розробленого методу відновлення на прикладі валу розподільного 150.03.022 – 1 дизель – генератора 6ЧН 12/14

6.4.1 Характеристика дизель – генератора і його деталей, які підлягають відновленню, для реалізації проведених досліджень і розробки методу підвищення їх ресурсу на основі комбінованої технології ремонту

Для реалізації проведених досліджень і для розробки технології відновлення розподільного вала ДГ був обраний дизель – генератор ДГРА 220/500 (рис. 6.10).

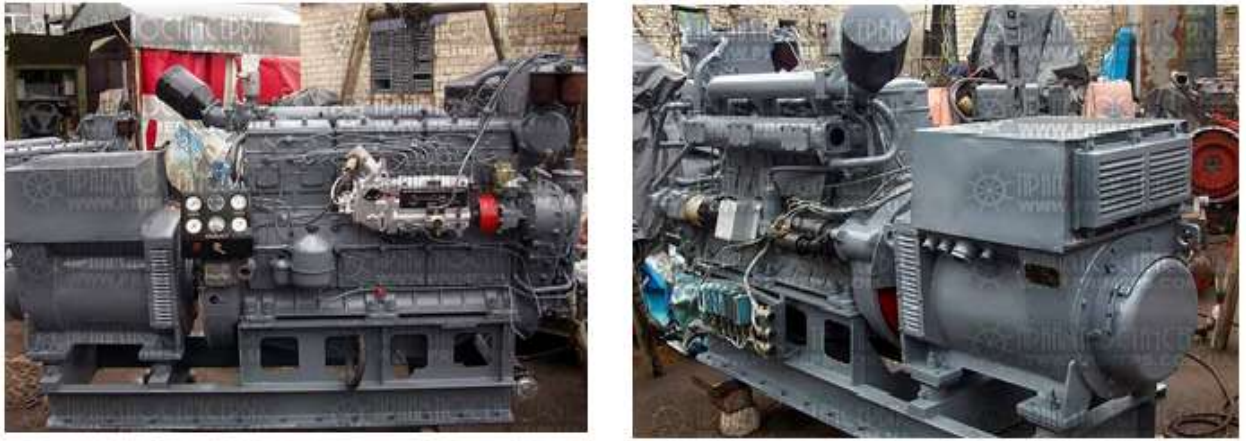


Рисунок 6.10 – Дизель – генератор з двигуном 6ЧН12/14.

Дизель 6ЧН 12/14 являє чотиритактний шестициліндровий двигун з газотурбінним наддувом, простого дії з однорядним розташуванням циліндрів, трековий, нереверсивний. Дизель має газотурбінний наддув з імпульсною системою, одним турбокомпресором і одним охолоджувачем наддувного повітря. Передача потужності від колінчастого валу дизеля до ротора генератора здійснюється через еластичну резину кордну шинну муфту. Компонування дизелів забезпечує вільний доступ до основних агрегатів, а люки в блоці дозволяють оглядати і при необхідності замінювати деталі шатунно-поршневої групи, не знімаючи дизель з фундаменту.

При виборі деталей дизель – генераторів, які підлягають відновленню, рекомендується керуватися низкою критеріїв: допустимий знос поверхні деталей, що підлягають відновленню не повинен перевищувати 1,0 – 3,5 мм; бажано, щоб нанесення захисного покриття було остаточним процесом, тобто без подальшого нанесення шару або інших трудомістких операцій; вибору матеріалів для нанесення покриттів повинен передувати критичний аналіз умов роботи деталей, вартості цих матеріалів і експлуатаційних можливостей нанесених покриттів; особливу увагу слід приділяти тим деталям, які при виході з ладу ведуть до великих технологічних втрат.

Аналіз умов експлуатації ДГ показав, що в першу чергу існує потреба у відновленні деталей, таких як вали. Розподільчий вал дизеля дизель – генератора (рис. 6.11) – одна з найбільш відповідальних деталей, що зазнає

під час експлуатації не тільки статичні, але й динамічні навантаження, що призводять до руйнування.

При розробці методу відновлення розподільного вала захисними покриттями необхідно враховувати і прогнозувати рівень допустимих напружень, який визначається значеннями величин адгезії покриття і когезійний взаємодії в системі «відновлювана поверхня – покриття».



Рисунок 6.11 – Розподільчий вал 150.03.022-1

Вал, відновлений по розробленій технології, повинен задовольняти нерівності [10, 18, 39,79, 157]:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq k [\sigma_{\text{зч}}] \quad (6.2)$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_3^2 + 3\tau_k^2}, \quad (6.3)$$

Напруження визначаються як

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{W_3}, \quad \tau_k = \frac{M_k}{W_k} \quad (6.4)$$

Для валу, $W_k = 2 \times W_3$, можна записати:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{32}{\pi d^2} \sqrt{M_3^2 + 0,75M_k^2} \quad (6.5)$$

Оскільки найбільшу складність для виробників представляє питання відновлення шийок розподільних валів, перш за все, необхідно виконати розрахунок, що дозволяє прогнозувати міцності покриттів за розробленим способом.

На вали діють сили інерції обертових мас і сили інерції мас, що рухаються зворотно – поступально [35, 36, 79, 124]. Діючі сили в сукупності викликають знакозмінні крутні та згинальні моменти, а також крутильні і поздовжні коливання, що створюють при резонансі додаткові напруги. Оскільки ці сили і моменти змінні, як за значенням, так і за напрямком, то при розрахунку необхідно враховувати найбільш несприятливі умови роботи валів. Несприятливими є умови роботи валів при режимі максимального крутного моменту $M_{кр}$. і частоті обертання 0,4 – 0,6 від номінальної частоти обертання валу [10, 18]. Дією інерційних навантажень нехтують. Загальна схема сумарних сил і моментів, які діють на вал в процесі експлуатації, представлена на рис. 6.12.

Сумарна сила визначається рівнянням:

$$P = P_r + P_j \quad (6.6)$$

При визначенні навантажень в елементах вала, до складових сумарної сили P додається складова сили інерції K_r обертових мас:

$$K_r = T_r \times r \times \omega^2 = (m_k + m_{шк}) r \times \omega^2 \quad (6.7)$$

$$m_k = m_{шш} + 2 m_{ш} \times r / r \quad (6.8)$$

$$m_{шш} = (0,7 \div 0,8) m_{ш} \quad (6.9)$$

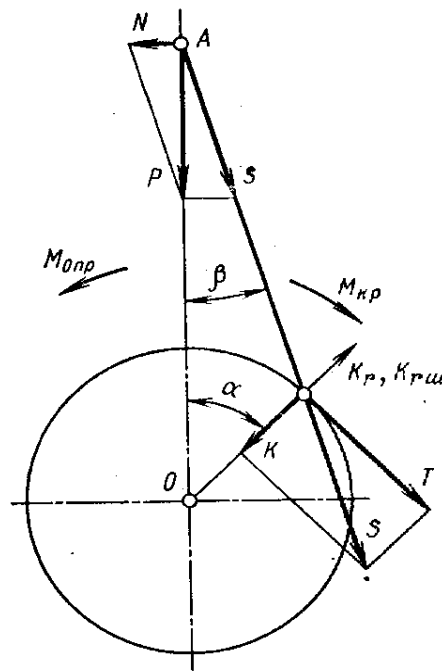


Рисунок 6.12– Загальна схема сумарних сил і моментів, що діють на вал

Сила інерції мас, що рухаються зворотно – поступально, визначається за формулою:

$$P_j = - m_j \times j = m_j \times r \times \omega^2 (\cos \alpha + r/L \cos 2\alpha) \quad (6.10)$$

Таким чином, умова міцності для шийки вала в найбільш небезпечному перерізі матиме вигляд:

$$\sigma_{екв} = \frac{a+b+0,5l}{0,4d^3} \left[\left(1 - \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{тст}}\right) \sqrt{K^2 + T^2} \right] + \left[\left(1 + \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{тст}}\right) \sqrt{K^2 + T^2 + 4\left(\frac{r}{a+b+0,5l}\right)^2 T^2} \right] \times \frac{a+b+0,5l}{0,4d^3} \leq k[\sigma_{зч}] \quad (6.11)$$

Аналіз особливостей деформації функціональних поверхонь розподільних валів в результаті дії робочих знакозмінних навантажень, при розгляді деталі як елемента динамічної системи, дозволяє підтвердити правильність вибору методу ремонту. Знаючи максимальні напруги, що

виникають у поверхні деталі, і маючи дані про властивості покриття, можна розрахунковим шляхом оцінити можливість використання обраного методу відновлення. При цьому необхідно враховувати динамічне навантаження, яке визначається зусиллями згину або стиску, що носять випадковий характер. Будь – які напруги, що викликають деформацію всього виробу або окремих його ділянок, впливають на адгезійні та когезійні характеристики покриття і в кінцевому підсумку, будуть визначати його працездатність. Можлива постановка і зворотної задачі, рішення якої визначить області раціонального використання обраного методу відновлення.

6.4.2 Розробка рекомендацій щодо практичного використання розробленого методу ремонту розподільчого валу ДГ

При виборі способу відновлення враховується, як правило, ряд факторів: конструктивні особливості деталі, умови її роботи в вузлі, величину і характер зносу матеріал і термічну обробку, розміри відновлюваної поверхні, наявність обладнання, надійність роботи деталі після відновлення, витрати на відновлення тощо.

Величина зносу, яка може бути відновлена комбінованим способом може перебувати в межах 0,1 – 1,5 мм. Комбінованим методом ЕІЛ + ЕДН + ПА доцільно відновлювати вали ЗТ з відношенням діаметра до довжини $\frac{d}{l} \geq \frac{1}{10}$. До деталей такого типу відносяться вали, осі, штоки, тонкостінні трубчасті деталі. Рекомендації до практичного використання розробленого методу відновлення наведені в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Рекомендації до практичного використання розробленого методу відновлення

Фактори	Параметри
Параметри поверхонь	
Пористість покриттів, %	5 – 15
Товщина покриттів, мм	0,1 – 1,5 – 3,0
Твердість, HRC	30 – 60

Продовження таблиці 6.7

Фактори	Параметри
Мінімальний діаметр відновлюваної деталі, мм	30
Шорсткість покриття, Ra после:	12,5 – 6,3
Параметри процесу ЕДН	
Струм дуги, А	100 – 400
Напруга на дузі, В	32
Тиск пропан-бутану, МПа	0,3 – 0,4
Тиск стисненого повітря, МПа	0,4 – 0,65
Витрата стисненого повітря, м ³ /год	80
Витрата пропан-бутану 0,011 кг / год	0,6 – 20
Дистанція напилення, мм	80 – 200
Діаметр дроту, мм	1,8 – 2,0
матеріал покриття	40X13, X18H10T
Імпульсне іонне азотування	
Температура, ° С	550 – 600
Тиск, МПа	200 – 230
Товщина дифузійного шару, мкм	90 – 500
Електроіскрова обробка	
Ефективний струм, А	0,6 – 0,8
Матеріал електрода	X20H80

6.4.3 Розробка технологічних процесів відновлення деталей ЗТ

На основі проведених досліджень були розроблені технологічні процеси відновлення опорних шийок розподільного вала 150.03.022 – 1 двигуна 6ЧН12/14 дизель – генератора ДГРА 220/500 нанесенням багатфункціональних покриттів комбінованим способом.

Розподільчий вал двигуна 6ЧН12/14 виготовляють з середньовуглецевої сталі 45 з поверхневим загартуванням і подальшим шліфуванням. Обертається розподільний вал в підшипниках ковзання, встановлених в перегородках блок – картера. Як підшипники ковзання використовуються втулки виготовлені з антифрикційного сплаву. Розподільчий вал двигуна 6ЧН12/14 має 5 опорних шийок діаметром 30 мм. Твердість опорних шийок становить 32 – 44 HRC.

В процесі експлуатації шийки вала змащуються під тиском маслом, яке надходить по каналах блок – картера і порожнину всередині валу. Вони працюють в сполученні з підшипниками ковзання в умовах гідроабразивного

зносу. При роботі валів на шийці валів діють циклічні навантаження, які прискорюють їх знос, а іноді призводять до вигину вала.

В результаті процесу зношування опорна шийка розподільного вала набуває овальності або конусності, коли він спрацьовується по діаметру може досягати 0,1 – 0,15 мм, після чого вал бракують або ремонтують.

Основними методами ремонту опорних шийок розподільного вала є шліфування до ремонтного розміру. Зношені шийки останнього ремонтного розміру відновлюють вібродуговим наплавленням електродом з високовуглецевої сталі. Відновлення зношених деталей вібродуговим наплавленням має ряд переваг перед іншими способами відновлення: низька напруга, при якій відбувається процес, безперервний характер - дозволяє вести наплавлення при малій глибині нагріву деталі, практично без її деформації. Однак поява внутрішніх напружень в наплавленому шарі і можливість утворення мікротріщин в результаті інтенсивного охолодження приводять до зниження втомленою міцності деталі, негативно позначається на експлуатаційних властивостях деталей машин, що працюють в умовах знакозмінних навантажень.

Розроблений комбінований метод ЕІЛ + ЕДН + ПА дозволяє уникнути недоліків властивих традиційним технологіям відновлення розподільних валів.

Технологічний процес відновлення шийок розподільного вала включає наступні операції:

- підготовча (мийка, дефектація);
- шліфування, з метою зняття дефектного шару і надання шийці правильної геометричної форми;
- обробка електроіскровим легуванням з метою забезпечення необхідної міцності зчеплення;
- нанесення покриття способом електродугового напилення;
- фінішна обробка при одночасному підвищенні твердості і зносостійкості відновлюваних поверхонь імпульсним іонним азотуванням.

У табл. 6.7 наведені технологічні параметри процесу відновлення. При відновленні валів використовували сталі 40X13 (мартенситного класу) і X18H10T (аустенітного класу). Зовнішній вигляд відновленої опорної шийки представлений на рис. 6.13.



а

б

в

Рисунок 6.13 – Відновлені шийки валів: а – зношена шийка; б – відновлені шийки після напилення; в – відновлена шийка після фінішної обробки ПА

6.4.4. Рекомендації по практичному використанню розробленої технології на прикладі валу Н13.550.51.150 – 03 насосу (СН) ВКС 2/266

У структурному відношенні ТП відновлення вала насосу можна розглядати як певним чином пов'язану сукупність способів усунення його дефектів, пошкоджень, відмов.

ТП відновлення валу насоса ВКС2 / 26 (рис. 6.14) комбінованим методом, що поєднує ЕІЛ, ЕДН і ПА складається з наступних операцій:

- підготовка матеріалів для покриттів;
- миття і очищення відновлюваної деталі;
- вхідний контроль (дефектація) деталі;
- попередня механічна обробка;
- електроіскрова обробка;
- контроль поверхонь після ЕІЛ;
- ізоляція перед електродуговим напиленням;
- формування напиляного шару ЕДН;

- контроль поверхонь після ЕДН;
- обробка відновлених поверхонь ПА;
- контроль відновлених поверхонь;
- консервація виробів для зберігання.



Рисунок 6.14 – Зношені поверхні вала Н13.550.51.150 насоса ВКС 2/26

Розбірно – очисні роботи, дефектоскопія деталей обов'язкові операції технологічного процесу ремонту та відновлення. Для визначення величин зносу поверхні вала насосу вимірювали діаметри вала, які підлягають відновленню, за допомогою штангенциркуля. З методів контролю прихованих дефектів валу використовували імпульсний ультразвуковий дефектоскоп [386 – 392], що відрізняється простотою і продуктивністю і дозволяє виявляти тріщини шириною 0,001 мм [386 – 392]. На рис. 6.15 надані зношені поверхні вала Н13.550.51.150 насоса ВКС2 / 26.



Рисунок 6.15 – Зношені поверхні вала Н13.550.51.150 вихрового консольного ступеневої насоса ВКС2 / 26, що підлягають відновленню: 1 – під підшипник; 2 – під ущільнення кришки підшипника; 3 – під робоче колесо; 4 – під сальникове ущільнення

Попередня обробка поверхні виконується різноманітними технологічними методами. На першій стадії підготовки поверхні проводиться знежирення для видалення різних забруднень. Далі слід механічна обробка поверхні. Механічна обробка призначена для виправлення дефектів (відхилень), виявлених при контролі.

Попередня механічна обробка поверхонь, які підлягають відновленню, здійснюється з метою: забезпечення необхідної товщини металу, що наноситься; для усунення дефектів, що утворилися в результаті експлуатації, і додання зношеним ділянкам правильної геометричної форми. Найменша глибина попередньої механічної обробки повинна бути достатньою, щоб забезпечити отримання мінімально необхідної товщини покриття і допуск на знос. У тих випадках, коли поверхня зношена нерівномірно, проводиться ступінчаста обточування. Там, де це можливо, ширина попередньо оброблюваної ділянки поверхні повинна бути на 15 – 20 мм більше ширини робочої ділянки поверхні. У всіх випадках на оброблюваній ділянці гострі кути і кромки повинні бути закруглені або мати фаски. Після механічної обробки відновлюваних поверхонь вала (рис. 6.16) необхідно провести поверхневий їх огляд за допомогою дефектоскопа або лупи.

Попереднє шліфування вала, що підлягає відновленню, до кінцевого ремонтного розміру (згідно з документацією на вал) проводили на спеціальному круглошліфувальні верстаті. Після попереднього шліфування вала здійснювали його огляд за допомогою ультразвукового дефектоскопа або лупи. При наявності тріщин вали вибраковують.



Рисунок 6.16 – Попередня механічна обробка зношених поверхонь валу

Підготовка поверхні для ЕДН. Існують наступні способи підготовки поверхні перед напиленням: механічний, хімічний, електроіскровий, дробоструменевий, напилення тонкого підшару молібдену. На практиці, найбільшого поширення набули два способи обробки відновлюваних поверхонь перед напиленням покриттів: механічна обробка (нарізування «рваною різьблення» або канавок з прокаткою).

Ізоляція перед напиленням ділянок поверхонь, що не підлягають відновленню ЕДН. Для запобігання налипанню напилюваного металу на ділянки вала, що не підлягають відновленню або близько прилеглі до місця напилення, їх покривають шаром захисної пасти (рис. 6.17) (мас.%): Графіт – 10, крейда – 20, мило – 70 [360]. Зазначена суміш розбавляється водою в співвідношенні 3:1 і наноситься на поверхню пензлем. Зазначена паста легко видаляється металевією щіткою після напилення.



Рисунок 6.17 – Поверхні валу насосу, що не підлягають напиленню з нанесеною захисною пастою

Параметри напилення встановлювали виходячи з узагальнення літературних даних і практичних рекомендацій щодо впливу чинників процесів електродугового напилення на властивості покриттів, а також, з огляду на власні дослідження.

Одним з важливих технологічних фактор при напиленні є дистанція напилювання. З одного боку підвищення дистанції сприяє підвищенню швидкості частинок, з іншого призводить до підвищеного окислення частки

і зниження її температури. Оптимальний діапазон дистанції напилювання згідно з дослідженнями знаходиться в діапазоні 80 – 150 мм.

Товщина напиляного шару регулюється швидкістю переміщення металізатора і числом їх проходів щодо поверхні покриття. Товщина напиляного шару за один прохід повинна складати 0,1 – 0,25 мм. Товщина покриття визначається за формулою (6.1):

Контроль напилених поверхонь. Припуск напиляного шару на механічну обробку становить від 1 до 2 мм, в залежності від товщини покриття. Відновлена поверхня валу насосу показана на рис.6.18.



Рисунок 6.18 – Відновлені поверхні валу насосу

Механічна обробка. Одна з умов успішної механічної обробки покриттів – зусилля різання, що виникають не повинні бути спрямовані на відрив шару покриття від відновлюваної поверхні, шар завжди повинен притискатися до основи. Структурні особливості та фазовий склад покриттів визначають вибір методів і режимів їх механічної обробки, відмінних від тих, що застосовуються при виготовленні деталей з однорідного металу. Припуск на механічну обробку становить від 0,5 до 2 мм, в залежності від товщини покриття. Відновлені вали можна обробляти гострінням або шліфуванням за рекомендаціями: швидкість різання при чорновій обробці бажано вибирати рівний 30 – 38 м/хв при подачі 0,15 мм/об. При цьому глибина різання не повинна перевищувати 0,1 мм. При чистової обробки покриттів відповідно: $V = 38 - 53$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $t = 0,1$ мм. Необхідний остаточний розмір

відновленої поверхні формується після фінішної обробки, як правило, шліфування. Режими шліфування слід підбирати такими, щоб вони не привели до викришування або розтріскування покриття. Шліфування ведуть абразивним кругом АСК, АСВ зернистістю 250/200 [383, 384], колами з електрокорунду або карбиду кремнію середньої твердості (СМ – 1, СМ – 2, СТ, СТ – 1, СТ – 2).

Режими шліфування кругами з карбиду кремнію або електрокорунду типу 24А 60ПС23.К5 зернистістю 150 – 200 мкм [383, 384]:

- швидкість шліфування 35 – 48 м / с;
- подача 0,06 – 0,08 мм/об, (1 – 3 м/хв);
- глибина при чорновому шліфуванні – 0,1– 0,5 мм;
- глибина при чистовому шліфуванні 0,01 – 0,03 мм;
- швидкість деталі 20 – 32 мм/хв.

Шліфування служить остаточною обробкою для покриттів. Для поліпшення оброблюваності слід застосовувати мастильно – охолоджуючі рідини. При шліфуванні застосовують емульсії (Амінол, МХО – 101, ПВК). Шорсткість відновленої поверхні після шліфування повинна бути не більше R_a 0,63. Відновлені поверхні вала після механічної обробки представлені на рис. 6.19.



Рисунок 6.19 – Відновлені поверхні вала з покриттям після остаточної обробки іонним азотуванням в імпульсному режимі

Контроль якості відновлених поверхонь валу насоса є необхідним елементом комбінованої технології її відновлення шляхом нанесення

захисних покриттів [360]. Відновлену поверхню валу насосу за зовнішнім виглядом контролюють, використовуючи лупи 10 кратного збільшення ЛПЗ, ЛП4. Покриття має бути рівномірним, однорідним за кольором. Тріщини, відколи, здуття і відшарування неприпустимі. Діаметр відновленої поверхні перевіряють штангенциркулем ШЦ – 11 – 160 – 0,05 або за допомогою мікрометра МРТ 150 – 0,002 на відповідність номінального розміру. Товщину покриття на відновленій поверхні контролюють штангенциркулем ШЦ 0-250 шляхом вимірювання зовнішнього діаметра деталі. Остаточна оброблена поверхня, відновлена за розробленою технологією, не повинна мати мікротріщин, відшарувань, забоїн, вм'ятин, слідів прижогів при шліфуванні і інших дефектів [390]. При виявленні дефектів, нанесений шар слід видалити і знову відновити [390].

Відновлені поверхні деталей після остаточної механічної або термомеханічної обробки необхідно змастити консерваційним мастилом К17. Законсервовані деталі після відновлення зберігають в спеціально відведеному для цього місці, закритому від атмосферних опадів.

6.4.5 Стендові та експлуатаційні випробування відновлених валів насосів

Перевірка працездатності валів насосів, відновлених за розробленою технологією, виконувалася на стендах. Досліджувані вали випробовувалися разом з валами відновленими напиленням. Одночасно було проаналізовано стан нових валів, які не підлягали ремонту. Тривалість проведення випробувань – 4 місяці. Порівняння експериментальних валів виконували до і після випробувань зовнішнім оглядом і вимірюванням величини зносу валів за допомогою універсальних вимірювальних засобів: вимірювальних центрів типу ПСМ – 500, мікрометрів, нутромірів, індикаторів годинникового типу. Результати випробувань наведені в табл. 6.8. Випробування показали, що відновлення опорних шийок вала насоса ВКС2/26 підвищило їх

зносостійкість в порівнянні з валами відновленими напиленням в 2 – 2,5 рази і в 1,7 рази в порівнянні з новими.

Таблиця 6.8 – Фізико-механічні властивості валів СН, відновлених за пропонованою технологією і нові деталі

Способи відновлення	Міцність зчеплення, МПа	Середнє значення зносу, мм
Нові	-	0,05 - 0,15
	-	0,05 - 0,1
Відновлений напиленням	100	0,025 - 0,05
	80	0,025 - 0,05

Проведені лабораторні та стендові випробування валів дизель - генераторів і насосів 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, що відновлені ЕДН.

6.5 Висновки до розділу 6

1. Встановлено, що 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 трибологічних сполучень 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 700 – 1100 К.

2. Застосування комбінації ЕДН і ПА відкриває нові можливості в відновленні деталей ЗТ багатофункціональними 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 18XH10T формується композиційна структура, яка представляє собою сталю матрицю із твердими нітридами, поява яких обумовлена інтенсивною дифузією по границям ламелей (конгломератів деформованих частинок дроту, що розпилюється).

3. 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.

4. 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. Після прискорених триботехнічних випробувань зразків із азотованими напиленими покриттями з дротяної сталі 40X13 протягом 9 годин не було виявлено помітного зношування.

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 $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення при інтенсивному пластичному перебігу в процесі фрикційної взаємодії. Мікротвердість шару при цьому зростає до 6500 МПа. Покриття, отримане осадженням частинок розміром 5 – 20 мкм має більш дисперсну структуру, характеризується зниженою зносостійкістю.

5. Розроблені рекомендації щодо практичного використання розробленої 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 40Х13 та Х18Н10Т (діаметр дроту 1,6 мм) з послідуєчим ПА .

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [10, 18, 24, 26, 35 – 37, 39, 46, 47].

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 КЕ 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 ЕІЛ запропоновано метод кількісного стереофрактографічного аналізу який показав, що адгезійна і когезійна міцність напилених покриттів збільшується в 1,5 – 2 рази.

4. Встановлено взаємозв'язок параметрів ЕДН (дистанції напилення, складу і властивостей 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 (при розпиленні стисненим повітрям), 400 – 500 м/с (розпилення сумішшю пропану і повітря) діаметр дроту – 1,6 – 2,0 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 ЗТ та їх КЕ на основі впливу факторів управляючої дії при формуванні багатофункціональних покриттів в результаті використання комбінованого способу їх 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 $\alpha - \text{Fe}$ (М) і аустенітної $\gamma - \text{Fe}$ (А) – 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 покриттів з сталей мартенситного класу і аустенітного класу – до 12000 МПа;

7. Встановлено, що інтенсивність зношування покриттів отриманих ЕДН зі сталі 40Х13 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 40Х13 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 ЕЛ і одночасним нанесенням підшару ніхрому і розпилювання матеріалу покриття сумішшю пропану і повітря підвищує міцність зчеплення напилених покриттів до 80 – 110 МПа. Щільність напилювання склала 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 ПА 670 – 770К. Підвищена зносостійкість азотованого напиленого покриття при температурі 770 К обумовлена його глибиною від 50 до 90 мкм і рівнем мікротвердості до 12000 МПа.

9. Розроблені рекомендації щодо практичного використання розробленої 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 X18Н10Т (діаметр дроту 1,6 мм) з послідуєчим ПА в умовах ДП «Палада» (м. Херсон);

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Магопєць 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. Pohorletskyi, 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. Агеев М.С. 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. Агеев, 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. Агеев 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: КДАВТ, 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 НІУ 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

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 теорій адгезии в формировании упрочняющих покрытий. Инженерия поверхности и реновация изделий: матеріали 18 – ї 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 Інженерія 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 – її 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, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы 16 – ой международной научно – практической конференция. (20 – 23 сентября 2016, Одесса). Одесса: 2016. С. 184 – 188.

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.

50. А.С. Полянский, Е.А. Дубинин, В.Н. Плетнев Анализ и

классификация показателей ремонтпригодности средств транспорта. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Зб. наук. праць, Вип. 60. Харків: 2007. С. 165 – 169.

51. Г.В. Захаров Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. Учебник. М.: Транс Лит., 2009. 256 с.

52. С.В. Камкин, И.В. Возницкий, В.Ф. Большаков и др. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок. М.: Транспорт, 1996. 342 с.

53. Ф.И. Пантелеенко Новое в восстановительно – упрочняющих технологиях. Производство и ремонт машин: сб. матер. междуна. науч – техн. конф. Ставрополь: Изд – во СтГАУ «АГРУС». 2005. С. 58 – 63.

54. В.Н. Половинкин Новые высокие технологии на пути к внедрению в судостроении. Успехи ожидаемые и неожиданные: матер. конф. 2001. С.9 –10.

55. Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко Повышение надежности трибосопряжений. С-Пб.: Академия транспорта, 2001. 304 с.

56. В.В. Курчаткин Надежность и ремонт машин. М. Колос, 2000. 776 с.

57. Ю.А. Харламов, Н.А. Будагьянц Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин. Луганск: 2003, Том 1. 495 с.

58. Ф.И. Пантелеенко Восстановлению деталей машин: М.: 2003. 672 с.

59. А.Н. Щербаков Технологическое восстановление поверхностей трения деталей машин. Вестн. Брянский гос. техн. ун-та 2006. №2. С. 85 – 92.

60. В.Д. Лимончиков Методология обеспечения ресурса трибосопряжений механизмов летательных аппаратов по условиям износостойкости. Тр. ЦАГИ. 2004. № 2664. С. 264 – 269.

61. В. П. Бобровицкий, А. В. Сидоров Совершенствование системы ТО и Р оборудования в условиях централизации ремонтной службы предприятия. Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2011. № 1. С. 23 – 28.

62. В.Н. Семькин Обзор современных способов восстановления деталей машин. Прогрессивные технологии и оборудование в электронике и

машиностроении: меж. вуз. сб. науч. трудов. Воронеж: 2004. С. 82 – 86.

63. В.А. Кондратьев Классификация видов технологических процессов восстановления деталей. Иновационные технологии и оборудование машиностроит. комплекса: сб. науч. труд. Воронеж: 2005. Вып. 4. С. 32 – 34.

64. Б.А. Ляшенко, О.А. Розенберг, В.В. Ермолаев, В.И. Мирненко Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры. Тяжелое машиностроение. 2001. С. 21 – 23.

65. В. В. Долгов, Н.И. Пасько Управление ремонтным обслуживанием технологического оборудования машиностроительного производства. Тула: 2005, 43 с. Деп. в ВИНТИ 05.05.2005.

66. Б.П. Башуров Трибологические отказы – фактор, определяющий функциональную надежность транспортных систем. Механика и трибология транспортных систем: сб. межд. конгр. Ростов на Дону: 2003. Т.1. С. 72 – 74.

67. Д.Н. Гаркунов Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003. 344с.

68. И.Д. Ибатуллин Кинетический критерий повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, деформируемых трением Вестник СГАУ. 2006. № 2, ч.2. С. 204 – 209.

69. Д.Г. Громановский Проблемы кинетики изнашивания. Механика и трибология транспортных систем: сб. межд. конгр. Ростов-на-Дону: 2003.Т.1. С. 252 – 257.

70. Д.П. Марков Адгезионно – инициируемые типы катастрофического изнашивания. Трение и износ. 2002. Т. 23. № 5. С. 483 – 493.

71. D. Markov, D. Kelly Establishment of a new class of wear: adhesion initiated catastrophic wear. Int. J. Appl. Mech. and Eng. 2002. 7, №3. P. 887 – 901.

72. D. Landolf Third body effects and materials fluxes in tribocorrosion systems involving a sliding contact. Wea. 2004. 256, № 5. P. 517 – 524.

73. J. Takadom, J. Miner, Wear–corrosion behaviour of some metals. Metals and Mater. JOM: 2000. 52, № 11. P. 131.

74. К.М. Фролов Усталость и трение: взаимодействие повреждений. Трибофатика: сб. докл. 5 межд. симп. Иркутск: 2005. Т.1. С. 15 – 16.
75. И.М. Петрова Влияние износа на накопление усталостных повреждений. Заводская лаборатория: Диагностика материалов 2006. 72, №11. С. 49 – 52.
76. Л.А. Сосновский Анализ механических состояний силовых систем. Состояние поврежденности. Проблемы прочности. 2003. № 5. С. 50 – 70.
77. Л.А. Сосновский Анализ механических состояний силовых систем. Предельное состояния. Проблемы прочности. 2003. № 5. С. 36 – 49.
78. Б.А. Ляшенко Анализ причин изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы двигателя: матер. 11-й межд. науч.-техн. конф. Киев: 2011. С. 120 – 124.
79. И. В. Возницкий Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. С – Петербург: 2006. 321 с.
80. А.С. Полянский, В.Г. Кухтов, Дубинин Е.А., Плетнев В.Н. Повышение ремонтпригодности автотракторной техники. Автомобильный транспорт: Сб. науч. трудов, Харьков: ХНАДУ, 2006. Вып. 18. С. 27 – 30.
81. Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева Материаловедение. М.: 1990. 528 с.
82. В.А. Мерзляков, С.В. Новиков База данных физико-механических свойств материалов и ее использование в пакетах прикладных программ. Проблемы прочности 1997. № 4. С. 90 – 94.
83. Покрытия и их использование в технике. Прочность материалов и конструкций: под ред. В.Т. Трощенко. К.: 2006. С. 981 – 1074.
84. М.В. Астахов Износостойкие покрытия для восстановления и изготовления деталей машин Технология металлов. 2005. № 1. С. 40 – 42.
85. А.Н. Шоев Научно-технологические технологии нанесения покрытий. Научно-технологические технологии в машиностроении. 2012, № 11. С. 27 – 33.
86. П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко Теория и практика нанесения защитных покрытий. Минск: Беларуская навука, 1998. 583 с.
87. Ю.С. Борисов Интегрированный банк данных по защитным

покрытиям. Современные достижения в области технологий и применения газотермических и вакуумных покрытий. АН УССР. Ин-т электросварки. Киев: 1991. С. 102 – 107.

88. Ю.С. Борисов Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Порош, металлургия. 1993. №7. С.5-14.

89. О.В. Цыгулев Методы повышения долговечности элементов конструкций многофункциональными упрочняющими покрытиями: автореф. дис. д-ра техн. наук. Киев: ИПП АН УССР, 1989. 32 с.

90. В.Л. Луканин Многофункциональные композиционные покрытия нового типа. Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: матер. 14 межд. науч.-практ. конф. С-Петербург: 2012. Ч.2. С. 225 – 230.

91. В.А. Кондратьев Выбор рационального метода восстановления. Иновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: междун. сб. науч. трудов. Воронеж: 2005. Вып. 4. С. 35 – 38.

92. А.М. Кадытерметов О выборе технологии восстановления поверхностей трения деталей, работающих при динамических нагрузках. Перспект. технол., транспорт. средства и оборуд. при производ., эксплуат., сервисе и ремонте: сборн. науч. труд. Воронеж: 2006. Вып. 1. С. 17 – 22.

93. И.Г. Голубев Мониторинг технологических процессов восстановления деталей. Труды Моск. гос. ун-т леса. 2000, №306. С. 31 – 34.

94. И.Н. Кравченко Комплексный анализ методик выбора рациональных способов восстановления деталей машин. Ремонт, строительство, модернизация. М.: 2007, №3. С.40 – 44.

95. Д.Л. Панкратов Восстановление изношенных деталей пластической деформацией. Кузн. – штамп, пр-во. Обработ. матер. давл. 2006, №6. С. 30 – 33.

96. Ф.Я. Рудик, Н.Б. Годунов Восстановление шлицевых поверхностей накаткой с профилированием шлицев. Справ. Инж. ж. 2009, № 11. С. 11 – 13.

97. А.В. Никифоров Формирование поверхностных покрытий для осуществления лазерной упрочняющей обработки. Поверхн. слой, точность и эксплуат. свойства деталей маши: матер. межотрасл. сем. М.: 1991. С. 41.

98. S.Z. Shuja, B.S. Yilbas Laser melting of alumina-coated steel. *AIChE Journal*, 2011. 57, № 9. P. 2547 – 2554.
99. Л.Г. Ворошнин Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. 133 с.
100. Ю.М. Лахтин Теория и технология азотирования. М.: 1991. 320 с.
101. Б. Вилаге Особенности газотермического напыления покрытий порошковыми проволоками Автоматическая сварка. 2011, №10. С. 26 – 30.
102. С.П. Кочугов, Б.А. Потехин Восстановление деталей оборудования методами газотермического напыления Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: монограф. сборник матер. Екатеринбург: 2009. С. 351 – 352.
103. С.Г. Мчедлов Газотермические покрытия в технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Свароч. пр-во. 2007. №10. С. 35 – 45.
104. С.В. Петров Сверхзвуковое газотермическое напыление повышает качество ремонта. Ремонт, восстанов., модернизация. 2005. №2. С. 14 – 20.
105. С.В. Петров Газотермические покрытия для упрочнения тяжело нагруженных деталей мощных дизелей. Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. №6. С. 20 – 30.
106. Л.Х. Балдаев Перспективы применения газотермического напыления при ремонте и производстве оборудования в промышленности (ООО «ТСЗП»). Компрес. техн. и пневмат. 2004. №5. С. 33 – 34.
107. А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас Формирование газотермических покрытий: теория и практика. Минск: 2002. 345 с.
108. Ю.А. Харламов Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин. Тяжелое машиностроение. 2000 №2. С. 3 – 10.
109. Ю.С. Борисов Современные тенденции в развитии газотермического напыления покрытий. Пленки и покрытия 98: труды 5-й междун. конф. СПб.: 1998. С. 14 – 19.
110. ДСТУ 3761.1 – 98 – ДСТУ 3761.5 – 98 “Зварювання та споріднені процеси” Терміни та визначення.

111. В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Мн.: Навука і тэхніка, 1996. 375с.
112. В.Б. Хмелевская Основы технологии восстановления деталей дизелей методом газотермического напыления: дис. д-ра техн. наук. СПб: СПГУВК. 1996. 334 с.
113. В.Н. Денисов Восстановление деталей компрессорного и насосного оборудования газотермическими покрытиями. Современ. пробл. свароч. науки и техн. «Сварка-95»: матер. науч. – техн. конф. Пермь: 1995. С. 78 – 80.
114. С.Р. Howes Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. Well. J. 1994. 73, №4. P. 47 – 51.
115. П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. Теория и практика газотермического напыления. Минск: Наука і тэхніка, 1993. 295 с.
116. Ю.С. Борисов Новые детали для восстановления и упрочнения деталей методами газотермического напыления. Опыт востанов. и упрочнения деталей методами сварки, наплавки, напыления нефтеперераб. и нефтехим. оборуд.: тезисы докл. науч.-техн. семин. К.- М.: 1990. С. 9 – 11.
117. В.К. Шамко, А.С. Крзорез, П.К. Веришко Влияние свойств газотермических покрытий на эксплуатационные свойства восстановленной детали. Разраб, и применение технол., оборуд, и матер. Минск: 1990. 36 с.
118. А.Б. Корнев Разработка стратегии ремонта трибосопряжений крупногабаритных деталей с применением газотермического напыления в судоремонтном производстве: авт. дис. к.т.н: 05.08.04. Н. Новгород: 2006.23с.
119. Противокоррозионное покрытие для коленчатых валов. Ausgezeichneter IK-PUR-Lack. Produktion. 2006. №37. P. 26.
120. А.Л. Ахтулов, П.А. Малыгин Технологический процесс восстановления шеек коленчатого вала газотермическим напылением: матер. межд. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во СИБАДИ, 2005. Кн. 1. С. 83 – 84.
- 121 В.В. Щепетов Зносостійкі покриття, отримані детонаційним напилюванням. Зб. наук. праць ЦНДІ ЗС України. К.: 2002. №4(21). С. 21–27.

122. А.Я. Мовшович Разработка технологии детонационно – газового упрочнения. Технологические системы. 2001. №4. С. 41 – 44.
123. В.А. Богуслаев Перспективы развития метода детонационного нанесения покрытий. Технологические системы. 2001. №4. С. 5 – 9.
124. Ю.А. Харламов, И.А. Будагьянц Детонационно-газовые процессы в промышленности. Л.: Изд-во ВУГУ, 1998. 223 с.
- 125 С.Г. Мчедлов Газотермическое покрытие в технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Обзор. Ч. 1. Газопламенное и детонационное напыление. Сварочное пр-во. 2007, №10. С. 35 – 45, 63.
126. Патент 58032 Україна, МПК С23С 30/00, 14/00 Спосіб газополуменевого напилення тугоплавких порошків. 2011. Бюл. №6.
127. С.В. Петров Газопламенное сверхзвуковое напыление. Сварщик. 2005, №1. С. 14 – 15.
128. А.Ф. Ильюшенко Перспективы развития газопламенного напыления высококачественных покрытий. Тяжелое машиностр. 2000. №2. С.14 – 17.
129. П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. Теория и практика газопламенного напыления. Мн.: 1993. 294 с.
130. И.Н. Кравченко, В.В. Сельдяков, А.Ф. Пузряков Разработка специализированных информационных систем для проектирования технологических процессов нанесения плазменных покрытий. Строительные и дорожные машины. 2014. № 3. С. 43 – 46.
131. А.М. Кадырметов Повышение ресурса деталей машин методами воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий. Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: сб. труд. Воронеж: 2006. Вып. 1. С. 36 – 41.
132. В.П. Петровский Технология восстановления и защиты деталей и конструкций методом плазменного сверхзвукового газотермического напыления покрытий. Физика экстрем. состоян. вещества. 2004. С. 201 – 203.
133. В.В. Кудинов Нанесение покрытий плазмой М.: Наука. 1990. 408 с.

134. А.В. Рутковский Конструктивна міцність матеріалів з вакуум-плазмовими покриттями: автор. к. т. н. ІПМіц НАН України, Київ: 2000. 17 с.
135. А.В. Рутковский, Б.А. Ляшенко Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий. Пробл. прочности. 1999. №6. С. 123 – 127.
136. В.Н. Бороненков Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. УрГУ; Екатеринбург: Унив. изд-во. 2012, 267 с.
137. М.А. Белоцерковский Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации. Инновации в машиностроении: сборник научн. трудов. Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008. С. 479 – 484.
138. В.А. Демьянов, А.П. Мурашов, Ю.С. Борисов, А.П. Грищенко Применение электродуговой металлизации для антикоррозионной защиты телевизионной башни в Киеве. Сварщик. 2005. №3. С. 19 – 21.
139. М.А. Белоцерковский Опыт эксплуатации деталей транспортных машин, восстановленных активированной металлизацией. Проблемы безопас. на транспорте: труды III межд. науч.-практ. конф. Гомель: 2005. С. 237 – 238.
140. Л.А. Лопата Дослідження відновлення автомобільних деталей типу «вал» електродуговою металізацією. «Констр, и технология производства с/х машин»: Збірн. наук. праць. Кіровоград: 2005. Вип. №35. С. 409 – 416.
141. Н.Н. Литовченко, И.В. Денисов Восстановление дисков сцепления, тормозных барабанов, дисков и шкивов электродуговой металлизацией. Технол. машиностр. 2005, № 9. С. 42 – 43.
142. Ю.С. Коробов Эффективность применения активированной электродуговой металлизации защитных покрытий. Сварочное производство. 2005. №2. С. 47 – 50, 62, 64.
143. В.В. Сергеев, Ю.Л. Спиридонов, И.И. Фарахшин Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металлизацией. Сварочное производство. 2004. №2. С. 44-26.

144. Ю.С. Коробов Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий. Технология машиностроения. 2004. №6. С. 42 – 44.

145. С.В. Петров Восстановление металлизацией тяжело нагруженных дизельных коленвалов. Автоматическая сварка. 1999. №8. С. 43 – 46.

146. М.М. Студент Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків: автор. дис. на здобуття наук, ступеня к.т.н.: спец. 05.02.01. Львів: 1998. 18 с.

147. R. Unger, V. Belaschenko, W. Kratochvil A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15' International conference. Edited by Coddet. Nice: 1998. P. 1989 – 1995.

148. А.С. Прядко, Ю.С. Коробов, В.Л. Луканин Активированная дуговая металлизация – характеристики оборудования и его применение: Пленки и покрытия 98: труды 5-й междуна. конф. СПб.: 1998. С. 249 – 251.

149. В.И. Похмурский, Защитные и восстановительные электрометаллизационные покрытия из порошковых проволок. Новые процессы, и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия: труды ИЭС Киев: 1990. С. 66 – 69.

150. Datenbank fur das thermische Spritzen. Praktiker: 1996. 470 p.

151. В.А. Пик Восстановление шеек коленчатых валов электродуговой металлизацией. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Новополюцк: 1993. 70 с.

152. А.В. Бурякин, А.В. Кузьмин Электродуговая металлизация с распылением металла продуктами сгорания углеводородных топлив. Сварочное производство. 1993. №3. С. 7 – 9.

153. Б.П. Татаринев Металлизация с целью восстановления деталей. Современные методы наплавки, упрочняющие защитные покрытия и используемые материалы. тезисы докл науч.-техн. конф. Харьков: 1990. С. 134 – 135.

154. А. Хасуи Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

155. А. Хасуи Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240с.
156. В.В. Чигарев, В.Н. Алистратов Электродуговая наплавка композиционного сплава порошковой лентой. Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение. ИСМ АН УССР, Киев: 1991. С. 210 – 212.
157. Hou Qing-yu. Gao Jia-sheng Anhui gongye daxue xuebao. Ziran kexue ban J. Anhui Univ. Technol. Natur. Sci. 2003. № 1. P. 13 – 16.
158. Д.В. Амелин Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин электроконтактной наваркой. М: Агропромиздат, 1987. 157 с.
- 159 В.Є. Канарчук, Л.А. Лопата Електроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні і відновленні. Збірник наук. праць НТУ. Київ: 2001. Вип. №5. С. 3 – 6.
- 160 Ю.Р. Копылов, А.В. Толчеев Технология толстослойного восстановления изношенных деталей гальваномеханическим железнением. Упрочняющ. технол, и покрытия. 2008. №4. С. 17 – 19.
161. С.Ю. Жачкин Повышение качества восстановления деталей гальваническим покрытием. Инновац. технолог, и оборудов. машиностроит. комплекса: сборн. научн. трудов. Воронеж: 2005. Вып. 3. С. 23 – 33.
162. С. Ю. Жачкин, М. В. Астахов Холодное восстановление деталей машин методом гальваноконтактного осаждения покрытий. Ремонт, восстанов. модернизация. 2005. №8. С. 25 – 27.
163. В.М. Давыдов Оценка эффективности восстановления поверхностей деталей машин методом электроискрового легирования. Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: матер. 6-й межд. научно-техн. конф. Курск: 2008. Ч. I. С. 136-140.
164. А.Д. Верхотуров Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
165. В.А. Тимошенко Упрочнение и восстановление деталей электроискровым легированием. Механ, и электроф. с.-х. 1993. №1. С. 29 -32.

166. А.М. Иванов, Е.С. Лукин, В.В. Лепов Комбинированные методы упрочнения сталей. Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: матер. 5 – й межд. конф. М.: 2013. С. 239 – 240.

167. Б.А. Ляшенко, Л.А. Лопата Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих покрытий. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Наук. - техн. збірник. Кіровоград: 2011. Вип. 41, Ч.2. С. 73 – 79.

168. Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно и др. Методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов. Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №10. С. 36-42.

169. К.А. Ющенко Інженерія поверхні. Київ: Наук-а думка, 2007. 559 с.

170 Ю.А. Кузнецов Комбинированная технология получения керамических покрытий. Технология. машиностроения 2005. №4. С. 29 – 31.

171. А.В. Никифоров Эффективность комбинированной обработки в ремонтной технологии. Тяжелое машиностр. 2001. №2. С. 24 – 27.

172. В.М. Корж, Ю.С. Попіль Інженерія поверхні – новий технологічний напрямок виготовлення та відновлення деталей машин та конструкцій. Сучасне машинобудування. 1999. №1. С. 92 – 94.

173. Б.Е. Патон Современные электронно-лучевые технологии ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Автоматическая сварка. 2001. №2. С. 3 – 8.

174. И.Л. Поболь Использование электронно-лучевого воздействия в технологиях второго поколения поверхностной обработки металлических материалов. «Нов. матер, и техн. в трибол.»: сб. конф. Мн: 1992. С. 170 – 171.

175. Б.Е. Патон Современные электронно-лучевые технологии ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. «Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования на рубеже XXI века»: матер. междунар. науч.-техн. конф. С.-Петербург: 2000. С. 1 – 17.

176. Д.Н. Гречкин Контактно – дуговой метод повышения износостойкости деталей. Упроч. технол, и покрытия. 2006. Вып. 6. С. 21 –23.

177. В.М. Карпенко Электроконтактная наплавка порошковых материалов в металлической оболочке: Учеб. пособ. Краматорск: 2002. 128 с.

178. М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, Р.О. Азизов Получение износостойких покрытий активированным газотермическим напылением с последующим модифицированием. Вопр. материаловед. 2004. №2. С. 77 – 87.

179. А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, В.В. Клечко Структура и свойства газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами лазерного излучения. Порошковая металлургия, 2010. №33. С. 289 – 296.

180. Г.В. Похмурська, В.М. Довгуник, М.М. Студент Зносостійкість лазерномодифікованих електродугових покриттів з порошкового дроту ФМІ-2. ФХММ. 2003. 39. №4. С. 61 – 64.

181. Q. Wu, Z. Tao, K. Cui et al. Влияние технологии лазерного переплава на микроструктуру газотермически напыленных керамических покрытий. Heat Treat. Metals. 1995. №7. С. 7 – 10.

182. И.А. Подчерняева Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита. Технол. и орган, пр-ва. 1992. № 2. С. 42 – 43.

183. В.С. Голубев Лазерное оплавление газотермических покрытий. «Разработка и применение технологий, оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий»: тезисы науч.-практ. конф. Минск: 1990. С. 38.

184. В.А Клименов, В.П. Безбородов Физические основы лазерной и ультразвуковой обработки газотермических покрытий. Разработка и применение технол., оборуд, и материалы для газотерм. процессов нанесения защит. покрытий: тезисы науч.-практ. конф. Минск: 1990. С. 8 – 9.

185. Ф.Х. Бурумкулов, В.И. Иванов Восстановление и упрочнение рабочих поверхностей соединения деталей наноструктурированными покрытиями. Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. №3. С. 5 – 8.

186. М.И. Черновол, М.С. Агеев, О.А. Микосянчик, В.И. Жорник Способ получения износостойких покрытий «Инженерия поверхности и реновация изделий»: матер. 15 – й междунац. научно-техн. конф. С. 206 – 208.

187. Б.А. Мовчан Твердые высокодемпфирующие металлокерамические покрытия. «Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении»: тезисы докл. 2 – й межд. научн. – техн. конф. Киев: 2004. С. 129 – 130.
188. М. Хонинг Металлические и керамические покрытия. М.2000.517с.
189. М.И. Черновол Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями: Учеб. пособие. К.: Вища школа, 1992. 79 с.
190. М.П. Стратулат Получение толстослойных хромовых покрытий для восстановления деталей машин. Ремонт, восстановление, модернизация. 2006. №5. С.16 – 19.
191. В.Н. Гадалов Технология и средства восстановления стальных деталей с электроосажденными железохромистыми покрытиями цементацией в пастообразном карбюризаторе. Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. №2. С. 3 – 6.
192. Д.А. Чернявский Повышение эксплуатационных характеристик железных электролитических покрытий нитроцементацией: автореф канд. техн. наук. Курск: 2007. 15 с.
193. В.В. Савва Двадцатилетний опыт применения технологии МДО. "Быстрозакаленные материалы и покрытия": 12-я международная научно-техническая конференция, сборник трудов, М.: 2013. т. 1. С. 327 – 334.
194. И.Н. Паненко Формирование защитных оксидно-керамических покрытий на поверхности алюминиевых сплавов методом микродугового оксидирования: сборник тезисов и статей. Новочеркасск: 2011. С. 111 – 116.
195. А.В. Коломийченко Технология восстановления неразъемных подшипников скольжения с использованием модифицированных МДО-покрытий. Ремонт, восстанов., модернизация. 2006. № 11. С. 10 – 12.
196. Gu Jianfeng Jinshu rechuli-Heat Treat. Metals. 2013. №2. P. 1 – 9.
197. Fan Ruicheng, Gao Ming, Ma Yingche, Zha Xiangdong Effects of heat treatment and nitrogen on microstructure and mechanical properties of Cr12NiMo martensitic stainless steel. J. Mater. Sci. and Technol. 2012. 28. №11. P. 1059 – 1066.

198. И.И. Бутовский Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Электроэрозионное упрочнение. Техника и технология. ИКФ. Каталог. Часть I. 1998. 251 с.
199. А.С. 1262827, С23 С9/00. Способ электроэрозионного упрочнения.
200. А.Н. Щербаков Электромеханическое восстановление наружных поверхностей вращения. Справ. Инж. ж. 2004. №4. С. 63 – 64.
201. В.П. Багмутов Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, реализация. Новосибирск: Наука, 2003. 317 с.
202. А.А. Флис, В.С. Флис, Н.И. Крючкова Использование процесса электромеханической обработки для восстановления и ремонта стальных деталей. Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки: матер. науч.-техн. семина. С.-Петербург: 1992. С. 38 – 40.
203. А.А. Россошинский Микросварка давлением. К.: 1997.152с.
204. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учеб. /Под общ. ред. В.А. Бачина. М.: Машиностроение, 1991. 352 с.
205. В.К. Лебедев Сварка трением. Л: Машиностроение, 1987. 236 с.
206. Б.Д. Орлов и др. Технология и оборудование контактной сварки. Учебник для машиностроительных вузов. М: Машиностроение, 1986, 352 с.
207. А.А. Ерохин Основы сварки плавлением. М.: 1973. 448 с.
208. К.А. Кочергин Сварка давлением. Л.: Машиностроение. 1972. 272с
209. Ю.В. Клименко Электроконтактная наплавка. М.: 1978. 125 с.
210. Е. А. Смирнова Методы обработки самофлюсующихся покрытий. Индукционное оплавление. Науч.-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. 2011. № 4. С. 258 – 262, 307, 314.
211. В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1980. 183 с.
212. Л.А. Лопата и др. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием. Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. №3. С. 12 – 17.

213. М.В. Кіндрачук, В.М. Писаренко, Н.В. Іщук, М.В. Кіндрачук Формування зносостійких структур на сталях дискретною модифікацією поверхні. *Металознавство та обробка матеріалів*, 2009. №3. С. 11 – 17.

214. Е.К. Соловых Особенности технологии вакуум – плазменных покрытий дискретной структуры. *Инженерия поверхн. и реновации изделий: матер. 7-й межд. науч.-техн. конф. Киев: АТМ України. 2007. С. 184 – 186.*

215. Пат. 25412 Україна, С23С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів. та ін. Опубл. 10.08.07. Бюл. № 12.

216. С.А. Клименко Упрочнение поверхности деталей дискретной термической обработкой. *Упроч. технологии и покрытия. 2006. № 1. С. 9 –15.*

217. Б.А. Ляшенко Технологические, конструктивные и эксплуатационные особенности упрочняющих покрытий дискретной структуры на деталях машин и инструменте. «Машин, и техносф. XXI века»: сб. трудов XIII межд. научн. -техн. конф. Донецк: 2006. Том 4. С. 292 – 296.

218. В.В. Возненко Підвищення експлуатаційних характеристик деталей приладів шляхом формування поверхонь з дискретно-орієнтованою топографією: автор. дис. к.т.н., НТУУ. Київ: 2006. 20 с.

219. М.А. Подригало, В.Г. Гончаров Повышение надежности коленчатых валов дизельных двигателей нанесением дискретных покрытий. *Вестник НТУ «ХПИ»*. Харьков: Изд- во НТУ «ХПИ», 2003. № 4. С. 115 – 123.

220. Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович Упрочняющие покрытия дискретной структуры. *Технологические системы. 2001. №4. С. 17 – 25.*

221 Патент 33410, Україна. Спосіб нанесення дискретних зносостійких покриттів. Бюл. 2001. № 1.

222. Б.А. Ляшенко, О.А. Розенберг, В.В. Ермолаев и др. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры. *Тяжелое машиностроение. 2001. №2. С. 21 – 23.*

223. Б.А. Ляшенко, Ю.А. Кузема, О.В. Цыгулев Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью. *ИПП АН України. К.: 1984, 57с.*

224. М.С. Зундан Формирование многослойных покрытий с применением нанопорошков. "Наноструктурные материалы-2012: Россия-Украина-Беларусь": матер. межд. науч.-техн. конф. С-Петербург: 2012. 268 с.

225. Пат. 2497230, МПК H01L 21/268 (2006.01), B82B 3/00 (2006.01). №2012110142/28. Способ создания многослойной наноструктуры. Заявл. 19.03.2012; опубл. 27.10.2013.

226. Ю.А. Кузнецов, К.В. Кулаков Технология получения тонкослойной керамики при восстановлении деталей из коррозионностойких сплавов. Механизация и электрификация с.-х. 2007. №1. С. 36 – 37.

227. В.Н. Попов Исследование и анализ некоторых перспективных тонкослойных покрытий. Тр. Братского техн. ун-та. 2005. №2. С. 216 – 219.

228. В.Н. Анциферов, С.П. Косогор Многослойные вакуумно-плазменные покрытия на основе карбидов титана и хрома. Физ. и химия обработки материалов. 1996. №6. С. 61 – 65.

229. А.А. Воеводин, А.Л. Ерохин, С.Е. Спаский Модель выбора схемы многослойного ионно-плазменного покрытия на основе расчета напряжений в его слоях. Поверхность. Физ., химия, мех. 1991. №9. С. 78 – 83.

230. Е.В. Кочарян Влияние химико – термической обработки на пластичность электролитических осталенных покрытий. Упрочняющие технологии, и покрытия. 2011. №3. С. 31 – 33.

231. Е.В. Кочарян Влияние химико-термической обработки на твердость электролитических осталенных покрытий. Упрочняющие технологи, и покрытия. 2010. №12. С. 24 – 28.

232. И.Н. Росляков, Л.И. Рослякова Повышение сопротивления усталости и износостойкости стальных изделий, восстановленных гальваническим железнением, путем низкотемпературной нитроцементации. Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 7. С. 38 – 40.

233. M. Korzynski, A. Dzierwa Сопротивление усталости деталей с хромовым покрытием и возможность повышения усталостной прочности дробеструйной обработкой. Surface and Coat. Technol. 2009. №5. P. 615 – 620.

234. Y. Chen, X. Wu, H. Wang Влияние наклепа дробью на плазменное азотирование стали H13. Heat Treat. Metals 2008. №6. P.47 – 49.
235. Н.Г. Быковский Повышение долговечности зубчатых передач совмещением азотирования и поверхностного пластического деформирования. Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки: матер. науч.-техн. семинар. Л.: ЛДНТП, 1991. С. 34 – 35.
236. А.О. Корнієнко Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазерно-хіміко-термічною обробкою. Проблеми тертя та зношування: Науково-техн. зб. К.: НАУ. 2008 Вип. 49. Т.2. С.61 – 65.
237. Пат. України 31198, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки сталевих виробів. Бюл. №6. Опубл. 25.03.2008.
238. Пат. 19551 Україна, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки матеріалів. Опубл. 15.12.06. Бюл. №12.
239. Ю.М. Лахтин, Химико-термическая обработка лазерно-легированных сталей. Изв. вузов Чер. Metallurgy. 1997. №9. С. 64 – 67.
240. Г.В. Гурьянов, С.С. Годунов, П.Е. Кисель и др. Лазерная обработка износостойких композиционных электрохимических покрытий. Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №9. С. 32 – 37.
241. Г.И. Бровер, С.В. Крейнин Повышение качества никель-фосфорных покрытий лазерной обработкой. МИТОМ. 2009. №7. С. 33 – 36.
242. Н.Е. Семенова, М.Н. Игнатов Методика нанесения композиционных электрохимических покрытий для лазерного модифицирования поверхности. Вестник ПГТУ. Мех. технол. матер. и конструкций. 2003. №6. С. 28 – 30.
243. Э.Ф. Штапенко Лазерно-стимулированное электроосаждение никелевых пленок. Metallofizika i nov. технол. 2007. 29. №3. С. 317 – 323.
244. О.В. Чудина, В.А. Александров Формирование диффузионного покрытия на поверхности стали путем лазерного и термодиффузионного легирования. Упрочн. технологии и покрытия. 2010. №4. С. 37 – 40.

245. Д.Ю. Магин Исследование структуры и свойств конструкционной малоуглеродистой легированной стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения. Будущее технической науки: сб. матер. 12-й межд. науч.-техн. конф. Н. Новгород: 2013. С. 293 -294.

246. О.В. Чудина Комбинированная технология поверхностного упрочнения с использованием лазерного легирования и азотирования. Методы упрочнения поверхностей деталей машин: сб. М.: 2008. С. 381 – 394.

247. О.В. Чудина Азотирование лазернолегированных сталей: сб. матер. 4-го собр. металлосведов России, Пенза: 1998. Часть 1. С. 90 – 91.

248. Luo Hong, Liu Jiajun, Liu Fen et al. Влияние лазерного упрочнения за счет фазового превращения на ионно-азотированный слой. Chin. J. Lasers. A. 1995. 22, №4. С. 313 – 316.

249. О.В. Чудина Комбинированное поверхностное упрочнение стали (лазерное легирование + азотирование). МИТОМ. 1994. №3. С. 2 – 5.

250. В.К. Ильин, О.В. Ильин Электромеханическая обработка как метод повышения несущей способности диффузионных покрытий. Изв. вузов. Пробл. энерг. 2011, №7-8. С. 119 – 122.

251. Э.М. Голубчик, Ю.Ф. Бахматов Разработка технологий с совмещенными операциями нанесения металлических покрытий и обработки давлением. Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: 1999. С. 67 – 70.

252. В.В. Берглезов Повышение физико – механических и триботехнических характеристик твердосплавных покрытий вибронакатыванием. Упроч. технол, и покрытия. М.: Машиностр., 2012. №2.

253. Х.М. Рахимьянов Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием. Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. 2011. №3. С. 18 – 22.

254. О.Б. Перевалова, А.В. Панин, Е.А. Синякова Особенности поверхностного упрочнения 12Cr-ферритно-мартенситной стали при совмещении ионно-плазменного азотирования и ультразвуковой обработки. Физ. и химия обраб. матер. 2012. №3. С. 43 – 50.

255. Y. Yang Покрытие из нанокристаллического никеля, полученное методом пульсирующего электроосаждения, совмещенного с ультразвуковой активацией. Jinshu xuebao – Acta met. sin. 2007. №8. P. 883 – 888.

256. Ю.Ф. Иванов, С.Ю. Филимонов, А.Д. Тересов и др. Легирование поверхности углеродистой стали медью путем электрического взрыва проводника и последующей электронно-лучевой обработкой. Изв. Томского политехн. ун-та. 2011. 318, №2. С. 101 – 105.

257 Е.С. Ващук Структура и микротвердость поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения и последующей электроннолучевой обработкой. Изв. вузов Чер. металлургия. 2011. №6. С. 24 – 28.

258. С.Ю. Филимонов Сопоставление поверхностного слоя стали, подвергнутой электровзрывному алитированию и электровзрывному меднению с последующей электронно-лучевой обработкой. Физ. и хим. высокоэнерг. систем: сб. матер. 6-й конф, учен. Томск: 2010. С. 407 – 410.

259. А.В. Вострецова Изменение структуры и свойств поверхности стали 45 при электровзрывном бороалитировании и электроннолучевой обработке. «Современное материаловедение и нанотехнологии»: матер. МНТК. Комсомольск – на Амуре: 2010. С. 149 – 153.

260. Ю.Ф. Иванов Модификация низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком поверхности стали, легированной электровзрывным методом. Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. №2. С.41 – 45.

261. А.Г. Радюк Повышение свойств алюминиевого газотермического покрытия щеточной обработкой. Чер. металлургия. 2009. №1. С. 34 – 35.

262. О.М. Пилипенко Вібраційна обробка газотермічних покриттів. Черкаси: Січ. 2000. 20 с.

263. К.В. Зайцев Разработка процесса ультразвуковой обработки стальных поверхностей перед газотермическим нанесением покрытий. Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: матер. 10-й науч.-практ. конф., Новосибирск: 2012. С. 46 – 49.

264. М.А. Глебова, А.Б. Корнев, В.В. Глебов и др. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом. Сварочное производство 2004. №6. С.43 – 46.

265. Ю.В. Соколов, М.А. Садова, Д.А. Попок Термическая обработка напыленных покрытий. Вестн. Беларус. нац. техн. ун-та. 2004. №3. С. 40 – 41.

266. А.А. Шипко Обработка газотермических покрытий с использованием индукционного нагрева. «Разработка и применение газотермических процессов нанесения защитных покрытий: тез. науч.– прак. конф. Минск.: 1990. С. 16 – 17.

267. Ohmori Akira, Takasaki Nobuhiro Sochi Yoshinobu Fusing of sprayed Ni – base coatings by induction heating. Trans. JWRI. 1992. 21, №2. С. 195 – 200.

268. А.В. Беззубко Модификация структуры и свойств газотермических покрытий с помощью электронно-лучевой обработки. Физ. и хим. Высокоэнергетических систем: сб. матер. 3 конф. Томск: 2007. С. 403 – 406.

269. В.В. Башенко Металлургические особенности модификации газотермических покрытий с использованием электронного луча. «Метал-я сварки и свароч. матер.»: межд. науч.-техн. конф., тез. СПб. 1993. С.194-197.

270. Tomie Michio, Abf Nobuyuki, Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting. Trans. JWRI. 1992. 21, №2. С. 229 – 300.

271. М.А. Белоцерковский Упрочнение химико-термической обработкой покрытий, полученных высокоскоростным распылением стальных проволок. Инженерия поверхности, Новые порошковые композиц. материалы. Сварка: сб. докл. межд. симп. Мн.: 2009. С. 178 – 184.

272. П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский Повышение качества газотермических покрытий из проволочных материалов методами химико-термической обработки. Трение и износ. 2003. Т. 24, №6. С. 666 –672.

273. М.И. Черновол Исследование триботехнических свойств газотермических покрытий, модифицированных электроконтактной обработкой. «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»: матер. 15 – й межд. научно – практ. конф. Киев: 2015. С. 191 – 196.

274. М.И. Черновол Структурно – фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и последующей электроконтактной обработки. Проблема тертя та зношування. Київ: НАУ, 2015. Вип. 2(67). С. 99 – 109.

275. Ю.В. Брусило Особенности покрытий, полученных электрометаллизацией с последующим электроконтактным припеканием. Вісник НТУ. Київ: 2009. №19, ч. 1, С. 50 – 66.

276. В.Я. Кершенбаум Механо-термическое формирование поверхностей трения. М: Машиностроение, 1987. 232 с.

277. Л.М. Капуткина Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Уч. пособие для студ-ов вузов. М: Интермед Инжиниринг, 2004. С. 220 – 240.

278. В.Н. Корж Управление качеством поверхности механотермическим методом электроконтактного упрочнения. Матер., технологии и оборуд. для восстан-я деталей машин. Мн.: 2003. С. 252 – 254.

279. В.С. Гончаров Гибридная технология газотермических упрочняющих покрытий при восстановлении деталей сложной геометрии. Проведение научных исследований в области машиностроения: сборник матер. Всерос. научно-технич. конфер. Тольятти: 2009. Ч. 1. 2009. С. 159-164.

280. В.Н. Гадалов Износостойкие и коррозионностойкие электроискровые покрытия из эвтектических сплавов на стали 30ХГСА. Упрочняющие технологии и покрытия. М.: 2006. №1. С. 22 – 25.

281. О.Г. Девойно Лазерная обработка электроискровых покрытий. Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: матер. межд. науч.-практ. конф. Минск: 2012. С. 81 – 82.
282. И.К. Соколов, А.Н. Еремичев Влияние способа подготовки напыляемой поверхности на прочность сцепления газотермического покрытия. Порошковая металлургия. Киев: 1993. №2. С. 26 – 30.
283. А.с. 1779697, МКИ⁵ С 23 С 4/02. Способ обработки поверхности под покрытия. Заяв. 04.12.90, опубл. 07.12.92. Бюл. № 45.
284. Controlled shot peening. Surface Eng. 1992. 8, №3. P. 169 – 171.
285. Г.М. Сорокин Об эволюции структурно-фазового состояния сталей при воздействии абразива. Трение и износ. 1991.Т. 12, №3. С. 396 – 402.
286. Е.М. Иванов, В.В. Кудинов К энергетической оценке влияния шероховатости и толщины подложки на прочность сцепления при напылении. Физика и химия обработки материалов. 1983. № 2. С. 68 – 74.
287. Буйкус Кястас Вито. Восстановление деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин активированной дуговой металлизации: дис. канд. техн. наук. Минск: 1998.
288. Е.Н. Матвейшин. Нанесение слоев с высокой прочностью сцепления методами электродуговой металлизации. Автоматическая сварка. 2000. №8. С. 20 – 22
289. И.Л. Куприянов, М.А. Геллер Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. Мн.: Беларуская навука. 1990. 176 с.
290. Л.И. Куприянов Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления для восстановления деталей машин. Порошковая металлургия. 1989, №13. С. 102 – 108.
291. Ж.А. Мрочек Обработка износостойких покрытий. Мн.: 1997.208с.
292. С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский и др. Точение износостойких защитных покрытий. К.: Техніка, 1997 146 с.
293. В.А. Кондратьев Особенности назначения припуска на механическую обработку при восстановлении деталей. Инновационные

технологии и оборудование машино-строительного комплекса: сборн. науч. трудов. Воронеж: 2005. Вып. 3. С. 132 – 134.

294. Ю.В. Брусило Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей поршневых двигателей электродуговым напылением. Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: 2010. №4(71). С. 38 – 42.

295. А.С. Прядко, Ю.В. Брусило Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта электродуговым напылением. Вестник ПГУ. Промышленность. Машиноведение и машиностроение. №3, 2014. Полоцк: С. 121 – 126.

296. Патент РБ № 4365. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты). Оpubл. 30.03.2002 г.

297. А.с. 1565536, МКИ³ В 05 В 7/22. Устройство для электродуговой металлизации. №4397254/31-05. Оpubл. 23.05.90, Бюл. №19. 4 с.

298. А.с. 1291216, МКИ5 В05В 7/22. Устройство для электродуговой металлизации. Оpubл. 23.02.87. бюл. №7. 3с.

299. Л.А. Лопата Повышение качества металлизационных покрытий. Високі технології в машинобудуванні. Харьков: 2002. №1. С. 175 – 179.

300. Л.А. Лопата Повышения качества напыленных покрытий. Мир Техники и Технологий, Междунар. технич. журнал. 2005. №8(54). С. 54-56.

301. Ю.В. Болдырев Влияние финишной обработки после электроискрового легирования на качество поверхности покрытия. Технология металлов. М.: Наука и технологии. 2006. №10. С. 36 – 38.

302. С.Г. Радченко Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. 274 с.

303. С.Г. Радченко Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навчальний посібник. К.: «Політехніка», 2001. 88 с.

304. С.М. Лапач Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Метод. вказівки до лаб. – комп'ют. практик. для студ. спец. «Технологія машинобудування». К.: НТУУ „КПІ”, 2007. 116 с.

305. Котельников Р.Б. Анализ результатов наблюдений. М.: 1986. 144 с.
306. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации: М.: 1980. 272 с.
307. С.П. Вислоух Многокритериальная оптимизация в технологических расчетах. Високі технології в машинобудуванні. Харьков: 2001. С. 94 – 98.
308. И.М. Соболев, Р.Б. Статников Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 111 с.
309. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, Н.И. Литвинчук Пакет прикладных программ ПРИАМ. К.: УкрНИИТИ, 1988. 4 с.
310. С.Н. Лапач Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели. НТУ КПИ. К.: 1993. С. 24 – 27.
311. А.А. Жиглявский, А.Г. Жилинскас Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 248 с.
312. В.Д. Подиновский, В.Д. Ногин Паретто – оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.
313. В.В. Налимов, Н.А Чернова Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 430 с.
314. С.М. Ермаков, В.З. Бродский, А.А. Жиглявский Математическая теория планирования эксперимента. М.: Наука, 1983. 392 с.
315. В.В. Налимов Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 207 с.
316. В.В. Федоров Теория оптимального эксперимента. М.: 1971. 312 с.
317. Ю.П. Адлер Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1969. 158 с.
318. Ю.П. Адлер, Е.В. Агаркова, Ю.В. Грановский Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 283с.
319. В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко Планирование эксперимента в технике. К.: Техніка, 1984. 200 с.
320. М.С. Винарский, М.В. Лурье Планирование эксперимента в технологических исследованиях. К.: Техніка, 1975. 168 с.

321. Н. Винер Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: 1958. 214 с.
322. Г.А. Иванов, А.Ф. Турбан Статистические методы восстановления истинной зависимости по экспериментальным данным. К.: Знание, 1986. 22 с.
323. В.Е. Гурман Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1998. 479 с.
324. Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов Таблицы математической статистики, М.: Наука, 1983. 416 с.
325. В.С. Королюк и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике М.: Наука, 1985. 640 с.
326. Ю.А. Толбатов, Б.П. Креденцер Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах. К.: Вища школа, 1994. 399 с.
327. И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков Прикладной линейный регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987. 239 с.
328. С.Г. Радченко, С.Н. Лапач Методология создания новой техники и технологий. Технологические системы. 2003. №1. С. 41 – 44.
329. В.Н. Спицнадель Основы системного анализа М.: 2003. 326 с.
330. Н.М. Скляр Конструктивная прочность металлов. Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. №6. С. 8 – 12.
331. К.В. Фролов Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин: аналитический обзор по проблеме «Прочность, долговечность и надежность продукции машиностроения» М.: 1989. 282 с.
332. Машиностроение: энциклопедия. Том IV-3. Надежность машин. Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2001. 592 с.
333. В.А. Острейковский. Теория надежности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
334. В.В. Налимов, Т.И. Голикова Логические основания планирования эксперимента. М.: Наука, 1976. 128 с.
335. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Под ред. Э.К. Лецкого. Пер. с немецкого. М.: Мир, 1977. 552 с.

336. Л.Х. Балдаев Требования, предъявляемые к современному оборудованию для ГТН. Хим. техн. 2004. №8. С. 28 – 31.
337. Аппарат электрометаллизационный ЭМ-17. ГОСТ 15150-79. Паспорт. Барнаул: БАМЗ, 1987. 22 с.
338. А.С. №1777966, МКИ⁵ В 05В 7/22. Устройство для электродуговой металлизации. Оpubл. 1989. Бюл. №44.
339. А.С. №1321476, МКИ⁵ В05В 7/22. Распылительная головка к электродуговому металлизатору. Оpubл. 1987. Бюл. № 25.
340. А. С. №1657230, МКИ⁵ В 05В 7/22. Распылительная головка к электрометаллизатору. Оpubл. 1991. Бюл. № 23.
341. Патент №2186632, МПИ⁷ В05В7/22. Устройство для дуговой металлизации. Оpubл. 2002. Бюл. № 22.
342. Патент №2162749, МКИ⁵ В05В7/22. Устройство для электродуговой металлизации. Оpubл. 2001. Бюл. №4.
343. Патент №2119389, МКИ В05В7/22. Устройство для электродуговой металлизации. Оpubл. 1998, бюл. № 27.
344. Патент №2134730, МКИ⁷ В05В7/22. Электрометаллизатор. Оpubл. 1999, бюл. №23.
345. Патент №2047395, МКИ⁵ В05В 7/22. Распылительная головка электродугового металлизатора. Оpubл. 1995, бюл. №31.
346. А.С. №1659126, МКИ⁵ В05В7/22. Распылительная головка электродугового металлизатора. Оpubл. 1991, бюл. №24.
347. Патент №2032480, МКИ⁵ В05В 7/22. Электродуговой распылитель металла. Оpubл. 1995, бюл. №10.
348. В.П. Смоленцев Установка для электроискрового восстановления деталей. Теория и практ. машин. оборуд.: труды межд. науч.-техн. конф. Воронеж: 1996. С. 137 – 138.
349. В.И. Рогов, Ю.А. Эпов Технологические возможности установки ЭДГУ-1 для электроискрового легирования. Повышение стойкости режущего инструмента. Саратов: 1983. С. 10 – 14.

350. Пат. 2146581. Устройство для электроискрового легирования. В23Н 9/00. Оpubл. 20.03.2000. БИ №8.

351. Пат. 2119414 Способ и устройство для электроискрового нанесения покрытий, В23Н 9/00. Оpubл. 27.09.98. БИ №27.

352. С.П. Фурсов, А.М. Парамонов, И.В. Добында и др. Источники питания для ЭИЛ. Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1983. 140 с.

353. Д.Н. Коротаев Система технического контроля электроискрового легирования. Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения: матер. межд. науч.-техн. конф. Комсомольск-на-Амуре: 2013. Ч. 1. С. 256 – 259.

354. Пат. 10014 України, МПК (2006) С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно – плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді. №19782; заявл. 19.09.06. Оpubл. 15.12.06. Бюл. №12.

355. Впровадження технології підвищення питомої потужності автотракторних двигунів за рахунок застосування поршнів з теплозахисними покриттями, отриманими за допомогою енергозберігаючої технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми: Звіт про НДР/ІПМіц. імені Г.С. Писаренко НАН України. Інв. №00574. К.: 2006. 159 с.

356. С.Н. Григорьев Разработка технологии и оборудования для комплексной ионно-плазменной обработки изделий. «Производственные технологии – 2001»: сб. статей и тезисов докл., М.: 2002. С. 95.

357. К.Ю. Яковчук, Е.Д. Пикж Установка для термоциклирования. Зав. лаборатория. 1988. №2. С. 65 – 66.

358. А.С. 2378494/25-28, МКИ С23С14/24 Оптическая термокамера. №3241271/18-21. Заяв. 15.02.81. Оpubл. 04.10.82. Бюл №2. 2 с.

359. И.С. Белашова Газотермоциклический метод регулируемых процессов азотирования. Технология машиностроения. 2004. № 5. С. 11 – 14.

360. В.Е. Зоткин Научные основы выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении: Учеб. пособ. для студ. вузов. М.: 1999. 282 с.

361. М.И. Черновол, Л.А. Лопата. Современные материалы для восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пос. Киров-д: 1994. 83 с.
362. М. И. Черновол Восстановление и упрочнение деталей машин с помощью новых износостойких материалов. М.: 1990. 64с.
363. Е.И. Марукович, М.И. Карпенко Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение. 2005. 429 с.
364. Н.А Буше Триботехнические материалы. Практическая трибология. Мировой опыт. Т.1 М.: Наука и техника, 1994. 451 с
365. Н.В. Лебедева, Ю.П. Солнцев Высокопрочные и специальные стали и сплавы: Конспекты лекций. СПб: СПбМТУ, 2004. 221с.
366. Ю.М. Лахтин Материаловедение. М.: 1990. 528 с.
367. В.К. Баженов, Р.Н. Чепелев Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2006. 48с.
368. В.А. Мерзляков База данных физико – механических свойств материалов и ее использование в ППП. Пробл. прочн. 1997 № 4. С. 90 – 94.
369. А.Ф. Гордеев Материалы для газотермического напыления покрытий. Технология металлургии. 2005. № 4. С. 47 – 55.
370. А.Н. Гончарова Современные материалы для газотермического напыления. Научное обеспечение агропромышленного производства: матер. межд. науч.-практ. конф. Курск: Ч. 3. 2012. С. 227 – 230.
371. Е.К. Фень Износо - и жаростойкие материалы покрытий для сверхзвукового плазменного и электродугового напыления. Сварщик: Технологии, производство, сервис. 2011. № 1. С. 32 – 35.
372. Заявка 483861 Япония, МКИ⁵ С 23 С 4/10, F 16 D 65/12 Проволочный материал для дугового напыления покрытий на ротор тормоза: Заявл. 24.7.90; Оpubл. 17.3.92 – 1956553; Сер. 3(4). 1992. 23. № 2. С. 407 – 411.
373. В.В. Козырев, М.Ю. Петров Получение и перспективы использования металлизированных порошковых материалов для упрочнения деталей машин. Технология машиностроения. 2004. № 3. С. 40 – 41.

374. В.И. Похмурский, И.И. Сидорак, М.М. Студент. Опыт применения порошковой проволоки ФМИ-2 для электрометаллизационного нанесения восстановительных покрытий. Автоматическая сварка. 2002. №2. С. 3 – 4.

375. В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.М. Довгунык и др. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации. Автоматическая сварка. 2002. № 3. С. 32-35.

376. Пат. 66911 Украина, МПК⁷ С23 С4/06, С23 С4/12. Порошковая проволока для электродугового напыления износостойких покрытий. №2001096178; заявл. 07.09.2001; опубл. 15.06.2004.

377. В.Б. Лебедев Экономический и технический эффект от применения новых износостойких и антифрикционных материалов. Оборудование и технологии для нефтегаз. комплекса. 2009. № 4. С. 29 – 32.

378. А.А. Горохов Современные материалы, техника и технология: матер. междунаучно-практ. конф. Курск: ЮЗГУ, 2011. 368 с.

379. С.И. Пинчук, Е.Э. Чигиринец Новые антикоррозионные материалы разработанные на основе ресурсосберегающих и экологичных "зеленых" технологий. Теория и практик. металлургии. 2012, № 3. С. 173 – 176.

380. В.Д. Белик, Р.В. Литвин, М. С. Ковальченко Металлы: Подгруппа железа: Справочник физических параметров. М.: Либроком, 2012. 156 с.

381. В.И. Рачков, С.М. Образцов Оптимизация химического состава ферритно-мартенситной стали в целях повышения кратковременных механических свойств. Атом. энергия. 2013. 115. № 1. С. 22 – 27.

382. И.Н. Лаптев, А.А. Пархоменко Диаграмма фазовых превращений в сплавах «железо-углерод-вакансии» в полях упругих напряжений. Вопросы атомной науки и техники. 2004. № 3. (85). С. 31 – 37.

383. И.В. Зельдович Мартенситные превращения, вызванные действием высоких статических и динамических давлений. ФММ. 1990. № 1. С. 151–158.

384. О.І. Юркова Формування наноструктури та механічних властивостей в - залізі під час інтенсивної пластичної деформації тертям: автор. дис. на здоб. наук. ступ. д.т.н. Київ: ІПМ НАН України. 2008. 38 с.

385. И.Н. Лаптев, А.А. Пархоменко О возможности образования мартенсита в аустенитных нержавеющей сталях под облучением. Вопросы атомной науки и техники. 2002. №6. С. 143 – 146.

386. Б.Н. Журкин Влияние электроимпульсной обработки стали на структурные и фазовые превращения. Электрофиз. методы и технологии воздействия на структуру и свойства метал. материалов. Л.: 1990. С. 63 – 64.

387. Ю.С.Коробов, П.М. Филиппов, В.И. Шумяков Диссипативная структура износостойких наплавочных материалов и покрытий с метастабильным аустенитом. Трение, износ, смазка. 2011. 13. №46. С. 1 – 2.

388. Ю.С. Коробов, А.М. Полякова, И.Л. Прядко Структура и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизации. Сварочное производство. 1997. № 1. С. 4 – 7.

389. Ю.С. Коробов Активированная дуговая металлизация - структурные особенности и свойства стальных покрытий. Пленки и покрытия '98: труды 5-й междуна. конф. 1998. Т. 14. СПб: С. 345 – 347.

390. Ю.В. Брусило Л.А. Лопата Влияние факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий. «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»: Збірник наук. праць КНТУ. 2010. Випуск 23. С. 287 – 297.

391. В.М. Константинов Влияние химического состава стальной проволоки на структурообразование и свойства покрытий при ЭДН. Упрочняющие технологии и покрытия. ПГУ. 2005. № 12. С. 40 – 46.

392. П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский Структура и свойства покрытий из стали 40Х13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления. Физическая мезомеханика. 2002. т.5, №1. С. 9.

393. М.И. Черновол, О.П. Штемпель, Л.А. Лопата Использование структурно-фазовых превращений и модифицирования при электроконтактной обработке стальных газотермических покрытий для повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники.

Вестник ПГУ. Серия В. Машиноведение и машиностроение. Новополоцк: 2016. Вип. №3. С. 115 – 122.

394. О.В. Роман Структурная оценка газотермических покрытий. Разработка и применение технологии, оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий: тезисы науч.-практ. конф. Минск: 1990. С. 6 – 7.

395. М.А. Белоцерковскнй Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования. Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. №10. С. 39 – 43.

396. А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева, Л.Ф. Прядко Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука. 1988. 224 с.

397. А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева Выбор материала электрода на массоперенос при электроискровом легировании. ПМ. 1985. №2. С. 36 -39.

398. Н.А. Богомоллова Практическая металлография. М.: 1987. 240 с.

399. М. Беккерт, Х. Клемм Справочник по металлографическому травлению. М.: Металлургия, 1979. 355 с.

400. В.А. Сясько, А.Е. Ивкин Методы и средства измерения толщины металлических покрытий. Мир гальваники. 2011. Ч. 2. №3. С. 47 – 50.

401. С.Б. Маслеников Применение микрорентгеноспектрального анализа. М.: Металлургия, 1968. 109 с.

402. Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, И. Эчлин Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. М.: Мир, 1984. 552 с.

403. Рентгенография в физическом металловедении. Под. ред. Багаряцкого Ю.А. М.: Металлургиздат, 1961. 368 с.

404. Г. Шиммедь Методика электронной микроскопии. М.: 1972. 467 с.

405. А.Я. Красовский Применение стереоскопической фрактографии. Проблемы прочности. 1978. №II. С. 101 – 108.

406. И.В. Крамаренко К анализу стереоизображений поверхности разрушения при стереофрактографических исследованиях. Проблемы прочности. 1985. №3. С. 84 – 87.

407. А.Я. Красовский, В.А. Степаненко Применение растровой электронной микроскопии для количественной стереофрактографии усталостных изломов. Проблемы прочности, 1977. №6. С. 35 – 38.

408. И.О. Гарелик Теория обработки стереопар, полученных в электронном микроскопе. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1965, № 4. С. 109 – 114.

409. А.Я. Красовский, В.А. Степаненко Изучение механизма распространения трещин усталости в никеле методом количественной стереоскопической фрактографии. Проблемы прочности. 1976. №II. С. 86 -94.

410. S. Seal, T. Warwick, N. Sobczak et al. Растрово-фотоэмиссионный микроскоп (SPEM) для исследования границы раздела в системе AlTi/C. J. Mater Sci Let. 2000. 19, №2. С. 123 – 126.

411. S. Wilhelm Time-and Coat-Saving Method for the Preparation of Stereoasopic Pairs of SEM Micrographe Practical Metallography. 1980. №17. P. 554 – 559.

412. В.А. Степаненко Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов. Проблемы прочности. 1979. 12. С.89–91.

413. J. Chermant, M. Coster Обзор по количественной фрактография. Review quantitative fractography. “J. Mater. Sci.” 1979. 14. №3. С. 509 – 534.

414. М.Л. Бернштейн Фрактография и атлас фрактограмм. М.: 1982.432с.

415. D. Broek Some contributions of electron fractography to the theory of fracture. Inter. Met. Rev. 1974. №19. P. 135 – 182.

416. A. Kraaowsky Vzťah lomove houzevnatosti a kritickeho otevreni trliny pri dynamicke zatezovani. Zvaranie. 31(1902). С. 11.322 – 326.

417. А.С. Скирдов Стереофотограмметрия. М.: Гостехиздат. 1951. 356с.

418. Н.Я. Бобир, А.Н. Лобанов, Фотограмметрия. М.: Недра, 1974. 421с.

419. Б.Я. Финковский, В.Н. Мельник Фотограмметрическая обработка снимков, полученных в растровом электронном микроскопе. Геодезия и картография. 1976. №9. С. 46 – 52.

420. A. Boyde, H.F. Ross Photogrammetric Record. Journal of Mikroscopy, 1975. №8. 46 p.
421. В.М. Сердюков Фотограмметрия. М.: Вища школа. 1983. 245 с.
422. А.А. Потапов Применения фрактального анализа для оценки качества инженерной поверхности и динамических свойств ее структуры. Механические свойства современных конструкционных материалов: сборник матер. М.: 2012. С. 197 – 199.
423. Bradai Mohand Amokrane Study of microstructure, phases and microhardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray. J. Mater. Process. Technol. 2008. 200. №1-3. С. 410 – 415.
424. Л.И. Тушинский, А.В. Плохов Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.
425. Л.И. Тушинский Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий М.: 2004. 384 с.
426. В.С. Иванова, В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
427. А.Г. Акуличев, В.В. Трофимов Неразрушающий контроль твердости изделий из конструкционных сталей рентгенодифракционным методом. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано-до макроуровня: матер. 13-й межд. науч.-практ. конф. С-Петербург: 2011. Ч. 2. С. 362 – 364.
428. Л.Г. Харитонов Измерение микротвердости. М.: 1967. 123 с.
429. М.А. Глебова, А.Б. Корнев, Е.К. Березин К вопросу о твердости газотермических покрытий. Контроль. Диагностика. 2003. №6. С. 39 – 43.
430. А.Н. Подображнж Взаимосвязь параметров плотности и пористости газотермических покрытий. Свароч. пр-во. 1996. № 2. С. 29 – 31.
431. H. Drzeniek Quantities and properties of layers sprayed with cored wire of type Fe-Cr-C. Thermal spray: Proceeding of the 15 Int. conf. 1998. P. 751 – 757.

432. A. Dey, S. Koria, R. Dube Model prediction and experimental validation of porosity in metal spray deposit. Powder Met. 2007. 50, № 4. P. 359 – 366.

402. 433 C. Gierl, B. Harrer, H. Danninger, J. Kastner, R. Schneider X-ray computed tomography for quantification of secondary pore structures in PM steels. Powder Met. Progr. 2011. 11, № 1-2. С. 85 – 89.

434. П.М. Шмелева Контроль работ по металлопокрытиям. М.: Машиностроение, 1985. 156 с.

435. С.Н. Виноградова Коррозия и защита от коррозии Пенза: 2000. 211с.

436. Г. Кеше Коррозия металлов. М.: Metallurgiya, 1984. 400 с.

437. Г. Улиг, Р. Реве Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия, 1989. 454 с.

438. Г.В. Акимов Теория и методы исследования коррозии металлов М.: 1995. 388 с.

439. Л.В. Кравчук ДСТУ 23.6794. Єдина система захисту від корозії та старіння. Метод випробувань на високотемпературну корозію. 1994. 27 с.

440. H. Wheat, G. Liu, A. Alonzo, K Johnson Corrosion sensing coatings for steel and aluminum alloys. The Proceedings of the 21 International Offshore and Polar Engineering Vol.4. Cupertino. 2011. P. 362 – 368.

441. К. Феттер Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. 209с.

442. ГОСТ 9.304-87. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1990.

443. С.А. Потемкин, Р.В. Жуков Информационная система по исследованию физико-механических и технологических свойств сталей: матер. науч. - техн. конф. Новомосковск: 1996. С. 13 – 14.

444. Б.А. Ляшенко Методика определения механических характеристик композиции металл-защитное покрытие. Пробл. прочн. 1989. №8. С. 113 -115.

445. В.С. Веремчук К определению прочностных характеристик элементов конструкций с покрытием повышенной деформативности. Проблемы прочности. 1986. № 11. С. 92 – 97.

446. Ю.В. Дмитриев Методологический подход к исследованию мех. характеристик материалов с покрытиями: дис. к.т.н. К.: 1990. С. 61 – 92.
447. Ю.А. Харламов Методы измерения адгезионной прочности покрытий. Заводская лаборатория. 1987. № 5. С. 63 – 69.
448. Стандарт Японии JIS H 8504-1984. Методы определения адгезии.
449. Nonaka Yasuo. Нихон сэттяку кекайи, Системы оценок адгезии. J. Adhes. Soc. Jap. 198 № 12. С. 551-556. РЖ “Сварка”. 1983, реф. 8. С. 63 – 69.
450. Liao Yi-do Новая методика определения прочности адгезионного сцепления покрытий. J. Wuhan technol. Mater. Sci. Ed. 2003. 18. № 1. С. 31 -32.
451. А. И. Камардин Устройства определения адгезионной прочности и пористости тонких покрытий. Управление качеством образования, продукции и окруж. среды: матер. 5-й науч-практ. конф. Барнаул: 2011. С. 156 – 158.
452. K.D. Bouzakis, A. Asimakopoulos, G. Scordaris et al. The inclined impact test: A novel method for the quantification of the adhesion properties of PVD films. Wear. 2007. V. 262, №11-12. P. 1471 – 1478.
- 453 Н.Н. Дорожкин Методические рекомендации по определению адгезионной прочности покрытий: Мн.: ИНДМАШ НАН Беларуси, 1985. 54с.
454. А.В. Мельников Определение прочности сцепления покрытия с основанием. Научно-техн. творчество: матер. конф. Самара: 2007. С. 53 – 56.
455. М.А. Глебова Контроль прочности сцепления газотермических покрытий. Упрочняющие технологии и покрытия 2005. №2. С. 45 – 50.
456. В.А. Малышев и др. Усовершенствованный метод определения прочности связи слоев в биметалле. Завод. лаборат-я. 1973. №2. С. 210 – 211.
457. А.И. Ульянов и др. Определение прочности сцепления сталей косвенными методами. ПМ №5. 1985. С.78.
458. Стандарт ФРГ DIN 0160-81. Определение прочности сцепления на отрыв посредством испытания на торцевой отрыв.
459. А.С. №1555650 Образец для определения прочности сцепления покрытия с основой на сдвиг. 08.12.1989. Бюл. №13.

460. А.Ф. Пузряков Сравнительный анализ методов определения прочности сцепления напылен. покрытий с основой. ПМ. 1987. №5. С. 88 -93.
461. С.П. Тимошенко Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
462. ГОСТ 1497-73. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
463. Ю.А. Авдеев Использование акустической эмиссии при оценке механических свойств покрытий. сб. тр. НИИ торгмаш. 1983. № 38. С. 87 –89.
464. Г.С. Писаренко Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 515 с.
465. В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский Сопротивление материалов деформированию и разрушению. К.: Часть 1. Наукова думка, 1993. 288 с.
466. В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский Сопротивление материалов деформированию и разрушению. К.: Наукова думка, Часть 2 1993. 702 с.
467. В.С. Иванова. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 160 с.
468. А.В. Бякова, В.Г. Горбач Сопротивление разрушению и оценка хрупкой прочности покрытий с начальным полем остаточных напряжений. Проблемы прочности. 1994. № 1. С. 51 – 61.
469. Л.А. Лопата Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий. Проблемы прочности, 2010. № 4. С. 71 – 76.
470. Е.Б. Сорока Остаточные напряжения при упрочнении деталей электроконтактным припеканием. Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-техніч. журнал. Полтава: 2010. №1(57). С. 98 – 103.
471. В.С. Антонюк Остаточные напряжения в вакуум-плазменных покрытиях. Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні: межд. конф. Київ: ІПМіц. НАН України, 2004. С. 13 – 14.
472. Пат. № 28383, Україна, МПК G01L 1/06. Спосіб визначення залишкових напружень в покриттях. Опубл. 10.12.2007. Бюл. №20. 4 с.
473. О.Б. Сорока Напруженість поверхні адгезійного контакту в системі “основа-покриття”. Вестник двигателестроения. 2007. №3. С. 8 – 10.

474. К. Бате, Е. Вилсон Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 447 с.
475. А.С. Сахаров, И. Альтенбах Метод конечных элементов в механике твердых тел. К.: Вища шк., 1982. 480 с.
476. О. Зенкевич Конечные элементы и аппроксимация. М.: 1986. 318 с.
477. А.В. Наседкин Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS. Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 1998. 44 с.
478. К.А. Басов ANSYS в примерах и задачах. М.: 2002. 224 с.
479. К.М. Рудаков Геометричне та скінчено-елементне моделювання конструкцій у MSC.visual NASTRAN for Windows: К.: 2005. 218 с.
480. Д.Г. Шимкович Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2001. 448 с.
481. В.И. Мяченков Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. М.: Машиностроение, 1989. 576 с.
482. Д.В. Першина Методика управления процессом формирования напряженного состояния напыленных покрытия. Вестник алтайской науки. 2013. № 2. ч. 1. С. 25 – 30.
483. С.Н. Liu, I.F. Chen Interface crack in a layered solid subjected to contact stresses. ASME, J. Appl. Mech. 1996. V. 63. P. 271 – 277.
484. В.Е. Панин Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах. Новосибирск: СО РАН, 2006. 519 с.
485. Н.А. Долгов, Е.Б. Сорока Сингулярность полей напряжений в системе основа-покрытие. Проблемы прочн. 2004. № 6. С. 119 – 127.
486. Материал «подложка-покрытие» с позиций системного анализа. Metalurgija Zagreb: 2012. 51. №3. С. 387.
487. Е.Б. Сорока Пути повышения самоорганизации системы основа-покрытие. Прочность материалов и элементов конструкций: труды междунауч.-техн. конф. Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН У2011. С. 561 – 573.
488. Е.Б. Сорока Повышение самоорганизации в системе основа-покрытие на основе управления НДС. Качество, стандартизация, контроль:

теория и практика: матер. 10-й межд. науч.-практ. конф. Киев: АТМ України, 2010. С. 124 – 126.

489. Циклические деформации и усталость металлов: В 2-х т. (Под ред. Трощенко В.Т.). Киев: Наукова думка, 1981. Т.1. 216 с.; Т.2. 221 с.

490. В.Т. Трощенко Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 244 с.

491. В.С. Иванова Природа усталости металлов. М. 1975. 413 с.

492. О.Г. Трапезон Методи розрахунку коливань мех. систем та їх використання при експер. вивченні в томи матер-в: авт. д.т.н. Київ: 1997. 30 с.

493. А.Г. Трапезон, Б.А. Ляшенко О продольных колебаниях стержня с покрытием. Проблемы прочности. 1994. № 10. С. 68 – 75.

494. ГОСТ 25.502-79. Методы испытаний на усталость.

495. ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 71 с.

496. А.И. Райченко Триботехническая оценка износостойких покрытий. Эффект. реализации научн., ресурсного и промышл. потенциала в современ. услов.: матер. 5-й юбил. промышл. конф., 2005 г., Киев: УИЦ. С. 286 – 288.

497. П.М. Лысенков Износостойкость как свойство материала. Вопр. материаловед. 2003. № 3. С. 96 – 8.

498. С.И. Дякин Обзор методов испытания на трение и изнашивание трибосопряжений механизмов и машин. Ремонт, восстановление, модернизация. №3. С.17 – 23. 2010.

499. В.С. Антонюк, О.Б. Сорока Розрахунковий метод визначення параметрів зносостійкого покриття. Вісник СумДУ, №11(83)2005 С. 13 – 18.

500. Л.Г. Коршунов Испытания металлов на износостойкость при трении. Метал, и терм. обраб. стали М.: 1991. Т.1, кн. 2. С. 387 – 413.

501. В.П. Бабак Непрерывный контроль процесса трения и изнашивания на основе использования метода акустической эмиссии. Технологические системы. 2004. №2. С. 42 – 46.

502. Ю.Н. Дроздов Структура методов расчета на износ. «Проблемы динамики и прочности механизмов и машин»: материалы науч. конф. Астрахань: 2002. С. 50 – 53.

503. Л.И. Евельсон Некоторые методы анализа трибологической информации. Трение и износ. 2003. 24. № 3. С. 323 – 328.

504. Г.М. Сорокин Инженерные критерии определения износостойкости сталей и сплавов при механическом изнашивании. Вестник машиностроения, 2001. №11. С. 57 – 59.

505. Ю.Н. Дроздов Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических, и геометрических факторов. Механика и трибология транспортных систем: сборник докл. межд. конгр. Ростов н/Д.: 2003. Т.1. С. 309 – 313.

506. Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесник Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228с.

507. Е.А. Ледков Исследование процессов формирования микрорельефа покрытий, получаемых методом электроискрового легирования. Теория и практика механической и электрофизической обработки материалов: матер. межд. науч.-техн. конф.: 2009. Ч. 2. С. 59 – 68.

508. I. Strode Влияние электроискровой обработки на целостность поверхности и мех. свойства стали. Surface Topogr. 1998, №1. С. 37 – 46.

509 А.Д. Верхотуров Повышение износостойкости покрытий за счет формирования спец. микрорельефа при электроискровом легировании. ФИХОМ. 2003. №2. С. 70 – 75.

510. Г.С. Каплина Теплозащитные покрытия с металлическим подслоем полученным электроискровым легированием. Сварщик. 2009. №4. С. 20 – 23.

511. А.Д. Верхотуров Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток: 1992. 180 с.

512. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев Снижение трудоемкости финишной механической обработки деталей с упрочняющими покрытиями. Современ. проблемы подготовки производства и ремонта в промышленности и на транспорте: матер. 16 – го межд. науч. – техн. семинара Киев: АТМ Украины, 2016. С. 150 – 153.

513. Б.А. Ляшенко, С.А. Клименко, М.С. Агеев О снижении объемов и трудоемкости финишной механической обработки упрочняющих покрытий. Наук. – вир. журнал «Інструментальний світ» 2015. № 1 - 4(61-64). С. 81 – 85

514. П.В. Каплун, О.А. Донченко Вплив технології азотування на механіку руйнування, міцність і довговічність конструкційних елементів. Вісник Технологічного університету Поділля. 2000. Ч.2. №3. С. 33 – 35.

515. О.В. Радько Формирование триботехнических свойств стальных деталей авиационной техники импульсным газотермоциклическим ионным азотированием: автореф. канд. дисс. К.: НАУ, 2008. 20с.

516. Б.А. Ляшенко Повышение прочности и износостойкости металлических изделий с помощью импульсной методики нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий. Пробл. прочности. 2014. №3. С. 155 – 163.

517. Б.А. Ляшенко Застосування іонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі. Вісник Житомирського держ. технолог. Ун-ту. Техн. науки. 2015, №3(74). С. 28 – 33.

518. О.Ф. Саленко Повышение износо-устойчивости стали 40X13 с помощью ионного вакуумного азотирования. Актуал. проблеми жит – ті сусп: матер. ХІХ міжн. наук. – прак. конф. Кременчук: 2012. С. 550 – 552.

519. О.Ю. Кумуржи Износостойкость стали 40X13 после упрочнения методом термоциклического ионно-плазменного азотирования в условиях абразивного изнашивания. Проблемы тертя та зношування. 2012. № 57. С. 240 – 250.

520 Б.А. Ляшенко Влияние ионно-плазменного термоциклического азотирования на абразивный износ стали 40X13. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: матер. 12 – го

межд. науч.-техн. сем. Киев: 2012. С. 171 – 174.

521. Б.А. Ляшенко Стойкость стали 40X13 к абразивному износу, обработанной ионно-плазменным термоциклического азотированием. Инженерия поверхности и реновация изделий: матер. 12 – й межд. научн. - техн. конф. Киев: С.194 – 196.

522. О.В. Радько Абразивна стійкість сталі 46X13 після зміцнення методом термоциклічного іонно-плазмового азотування. Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. №1(34). 2013. С. 156 – 160.

523. Б.А. Ляшенко Повышение циклической долговечности стали 40X13 методом вакуумного ионно – плазменного термоциклического азотирования. Современ. проблемы производства и ремонта в промышл, и на транспорте: матер. 11-го межд. научн. -техн. семин.. Киев: 2014. С. 147 – 149.

524. В.Г. Каплун Оптимизация технологии ионного азотирования в безводородных средах по параметрам прочности. Управление триботех, и прочностными свойствами мех. систем. Киев: УМКВО, 1990. С. 113 – 118.

525. Б.А Ляшенко, В.С Антонюк, С.П Выслоух, В.А Мазур, С.С Самогугин Оптимизация технологических параметров процесса формирования упрочняющих покрытий. Технологические системы №4, 2003. С. 44 – 47.

526. Кузін М.О. Визначення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів деталей з врахуванням умов експлуатації /М.О. Кузін// Українська академія друкарства. Поліграфія та видавнича справа. Науково-технічний збірник. – 2013. - № 3-4 (63-64). – с. 55-64.

527. В.В. Сергеев, Ю.Л. Спиридонов, И.И. Фарахшин. Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металлизацией// Сварочное производство. 2004. № 2, С.44-26

Додаток А

Відомості щодо впровадження результатів роботи



АКТ

**про реалізацію результатів наукових досліджень
Агєєва Максима Сергійовича**

Комісія у складі:

голови комісії – директор державного заводу «Паллада» Маломан В.Ф.
та членів комісії – головний інженер Марченко В.М.
начальник технічного відділу Шарафанов Ю.І.

встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Агєєвим М.С., були використані при оптимізації та апробації комбінованого способу і технології зміцнення, відновлення та ремонту таких деталей як:

- колінчастий вал 164.02.000 дизель – генератора 6ЧН12/14;
- розподільний вал 962.03.131 дизель – генератора 4Ч10,5/13;
- розподільний вал 150.03.022-1 дизель-генератора 6ЧН 12/14 методом

електродугового напилення дроту марки ПП-Нп-40Х13 та ПП-Нп-30ХГСА ТУУ 05416923.019-97 DIN 8555-MF-6-50-GT DIN 8555-UP6-GF-SF2-50 (діаметр дроту 1,6 мм) з послідуочим імпульсним іонним азотуванням. Товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм, загальна товщина напиленого шару покриття зі сталі 40Х13 та 30ХГСА на робочій поверхні після шліфування складає 1,0...1,2 мм. Режими азотування (концентрація аргону 80%, концентрація азоту 20%, тривалість азотування - 6 годин, робочий тиск азотування 200 МПа, температура процесу – 500...550⁰С. Глибина азотованого шару 0,2 мм. Твердість азотованого шару 60...70 НRC.

Проведений аналіз антифрикційних та протизношувальних властивостей отриманих покриттів свідчать, що вони характеризуються високим опором зношуванню. Зносостійкість напилених азотованих поверхонь товщиною 1,0...1,5 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, в порівнянні з напиленими покриттями без азотування.

Дані факти не є основою для фінансових претензій до підприємства.



Голова комісії

Члени комісії

(підпис)

Маломан В.Ф.

(прізвище, ініціали)

(підпис)

Марченко В.М.

(прізвище, ініціали)

(підпис)

Шарафанов Ю.І.

(прізвище, ініціали)



**АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»
РЕГІОНАЛЬНА ФІЛІЯ «ДОНЕЦЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»
СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ
«ПОПАСНЯНСЬКЕ ЛОКОМОТИВНЕ ДЕПО»**

вул. Дніпровська 1, м. Попасна, Луганська обл. 93300, тел.: +380 6474) 2-10-02

АКТ

**про реалізацію результатів дисертаційного дослідження
Агеєва Максима Сергійовича на тему: « Наукові основи забезпечення
надійності засобів транспорту та їх елементів застосуванням
багатофункціональних покриттів в процесі ремонту»**

«14» 12 2018 р.

м. Попасна

Цим актом підтверджується, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Агеєвим М.С., були використані при оптимізації та апробації комбінованого способу і технології зміцнення, відновлення та ремонту колінчастого валу і розподільного валу дизельного двигуна K6S310DR методом електродугового напилення дроту марки ПП-Нп-40X13 та ПП-Нп-30XГСА ТУУ 05416923.019-97 DIN 8555-MF-6-50-GT DIN 8555-UP6-GF-SF2-50 (діаметр дроту 1,6 мм) з послідуочим імпульсним іонним азотуванням. Товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм, загальна товщина напиленого шару покриття зі сталі 40X13 та 30XГСА на робочій поверхні після шліфування складає 1,0...1,2 мм. Режими азотування (концентрація аргону 80%, концентрація азоту 20%, тривалість азотування - 6 годин, робочий тиск азотування 200 МПа, температура процесу – 500...550⁰С. Глибина азотованого шару 0,2 мм. Твердість азотованого шару 60...70 HRC.

Проведений аналіз антифрикційних та протизношувальних властивостей отриманих покриттів свідчать, що вони характеризуються високим опором зношуванню. Зносостійкість напилених азотованих поверхонь товщиною 1,0...1,5 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, в порівнянні з напиленими покриттями без азотування.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

В.о. начальника структурного підрозділу
«Попаснянське локомотивне депо»
регіональної філії «Донецька залізниця»
АТ «Укрзалізниця»



М.О. Софієнко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Ремонтно-механічного



Лунін С.М.

_____ 2021 р.

АКТ

про передачу науково – методологічних результатів дисертаційного дослідження Агеєва Максима Сергійовича на тему: «Наукові основи забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів застосуванням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту» для подальшого розвитку та можливості реалізації в промисловій сфері

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Агеєва М.С. які стосуються підвищення експлуатаційних властивостей деталей шляхом використання багатофункціональних покриттів в процесі ремонту становлять практичний інтерес та можуть бути запропоновані для подальшого впровадження.

Агеєвим М.С. розроблено та науково обгрунтовано комбінований спосіб нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення зношених поверхонь деталей різного функціонального призначення.

Встановлені залежності показників якості (шорсткість, міцності зчеплення покриття з основою, пористість, лінійний та ваговий знос, корозійну стійкість, мікротвердість) комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів;

Розроблені математичні моделі процесу дифузійного насичення покриттів при імпульсному іонному азотуванні і представлені порівняння експериментальних даних з модельними уявленнями. Визначено вплив режимів імпульсного іонного азотування на перенесення мас в покриттях, глибину дифузії азоту на мікротвердість та трибологічні властивості покриттів отриманих електродуговим напиленням;

Надано рекомендації щодо організації ділянки з відновлення та підвищення експлуатаційних властивостей деталей шляхом синтезу окремих технологій (електроіскрове легування, електродугове напилення та іонне азотування) для забезпечення їх надійності та їх елементів.

Матеріали дисертаційного дослідження Агеєва М.С. мають перспективне практичне значення та сприятимуть підвищенню надійності відновлення деталей та їх елементів в процесі ремонту.

Даний акт не являється підставою для фінансових претензій до підприємства.

Інженер-технолог

Будуров Д.В.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з НДР ХДМА

Андрій БЕНЬ

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
 Агєєва Максима Сергійовича
 «Наукові основи забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів
 використанням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту»

Комісія у складі:

- Голова комісії – в.о декан факультету суднової енергетики Херсонської державної морської академії, к.т.н., доц. Акімов О.В.;

- Члени комісії:

завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, к.т.н., доц. Савчук В.П.;

к.т.н., доц. кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії Зінченко Д.О.

Склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження М.С Агєєва на тему « Наукові основи забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів використанням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту» використовуються в навчальному процесі Херсонської державної морської академії на кафедрі експлуатації суднових енергетичних установок.

Найменування впровадженого результату:

1. Спосіб відновлення деталей засобів транспорту шляхом нанесення багатофункціональних покриттів в процесі ремонту

2. Комбінований спосіб нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту та забезпечення їх надійності в процесі ремонту.

3. Метод управління ресурсом деталей засобів транспорту та їх елементів на основі впливу факторів управляючої дії (шорсткість поверхні, пористість, тиск, час та температура азотування, склад реакційного газу) при формуванні багатофункціональних покриттів в результаті використання комбінованого способу нанесення;

4. Технічні рекомендації щодо практичного використання розробленої технології ремонту деталей засобів транспорту на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Форма впровадження та досягнутий практичний ефект:

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у вигляді наочного матеріалу, удосконалення конспектів лекцій, матеріалів науково-дослідних робіт з курсантами і магістрантами, для викладення навчальних дисциплін: «Технічне обслуговування і ремонт суднових технічних засобів», «Організація та технологія судноремонту».

Голова комісії

В.о. декан ФСЕ, к.т.н., доц.

Олександр АКІМОВ

Члени комісії:

завідувач кафедри ЕСЕУ, к.т.н., доц.

Володимир САВЧУК

к.т.н., доц. кафедри ЕСЕУ

Дмитро ЗІНЧЕНКО.



«Затверджую»

Директор ТОВ «МОТОРТЕХ»

Гевецьков С.С.

_____ 2021 р.

АКТ

**про передачу результатів наукових досліджень
Агєєва Максима Сергійовича на тему: «Наукові основи забезпечення
надійності засобів транспорту та їх елементів застосуванням
багатофункціональних покриттів в процесі ремонту» для подальшого
використання у промисловій сфері**

Цим актом підтверджується, що результати наукових досліджень на тему «Наукові основи забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів застосуванням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту», отримані особисто Агєєвим М.С., та передані ООО «Мотортех» для подальшого використання в ході ремонтів двигунів внутрішнього згорання мають наступні методико – технологічні аспекти, що можуть бути використані та набути подальшого розвитку у промисловій сфері:

- обґрунтовано критерії, принципи та розроблена концепція ремонту шляхом нанесення зміцнюючих захисних покриттів комбінованим способом (електроіскрове легування, електродугове напилення та іонне азотування) для забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів;

- розроблено методологію управління ресурсом засобів транспорту та їх елементів на основі впливу факторів управляючої дії на формування багатофункціональних покриттів;

- встановлено залежності лінійного та вагового зносу багатофункціонального покриття від тривалості сухого тертя та вплив мікротвердості і температури азотування на їх зносостійкість;


- визначені і розроблені раціональні методи реалізації відновлення зношених поверхонь;

- розроблені рекомендації щодо вибору комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів в умовах ремонтного виробництва для забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів з ефективними техніко – економічними показниками.

Використання виконаної дисертаційної роботи дозволить розширити номенклатуру відновлюваних деталей двигунів внутрішнього згорання в тому числі і на транспортних засобах.

Даний акт не може бути основою для фінансових претензій до підприємства.

Провідний інженер, к.т.н., доцент  С.М.Литвин

Підпис Литвина С.М. підтверджую  С.О. Домчинська

Додаток Б

Види впливів, руйнівні процеси,
експлуатаційні відмови і пошкодження ЗТ

Додаток Б.1 Види впливів і руйнівні процеси при експлуатації ЗТ

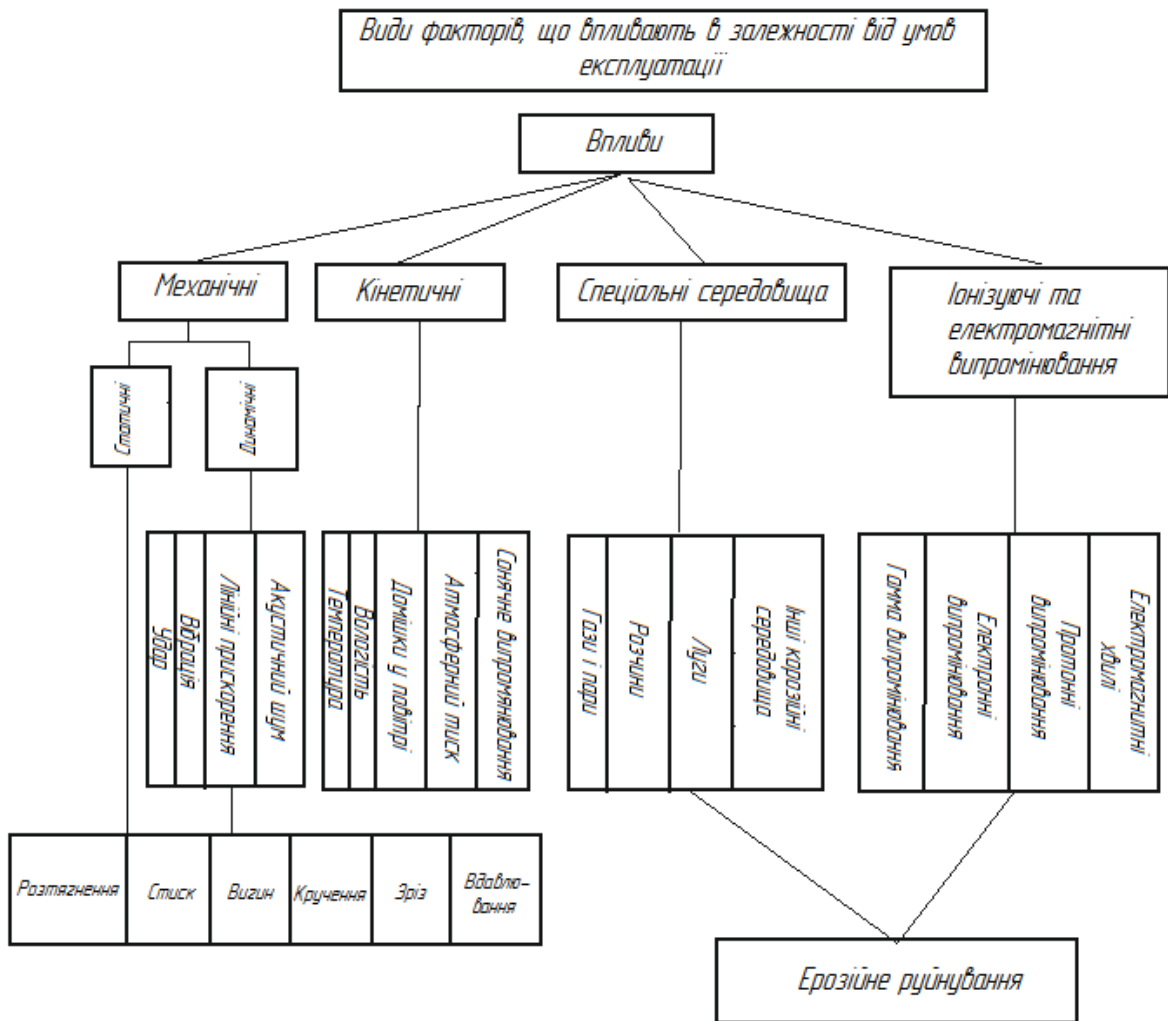


Рисунок Б.1 – Види впливів при експлуатації ЗТ

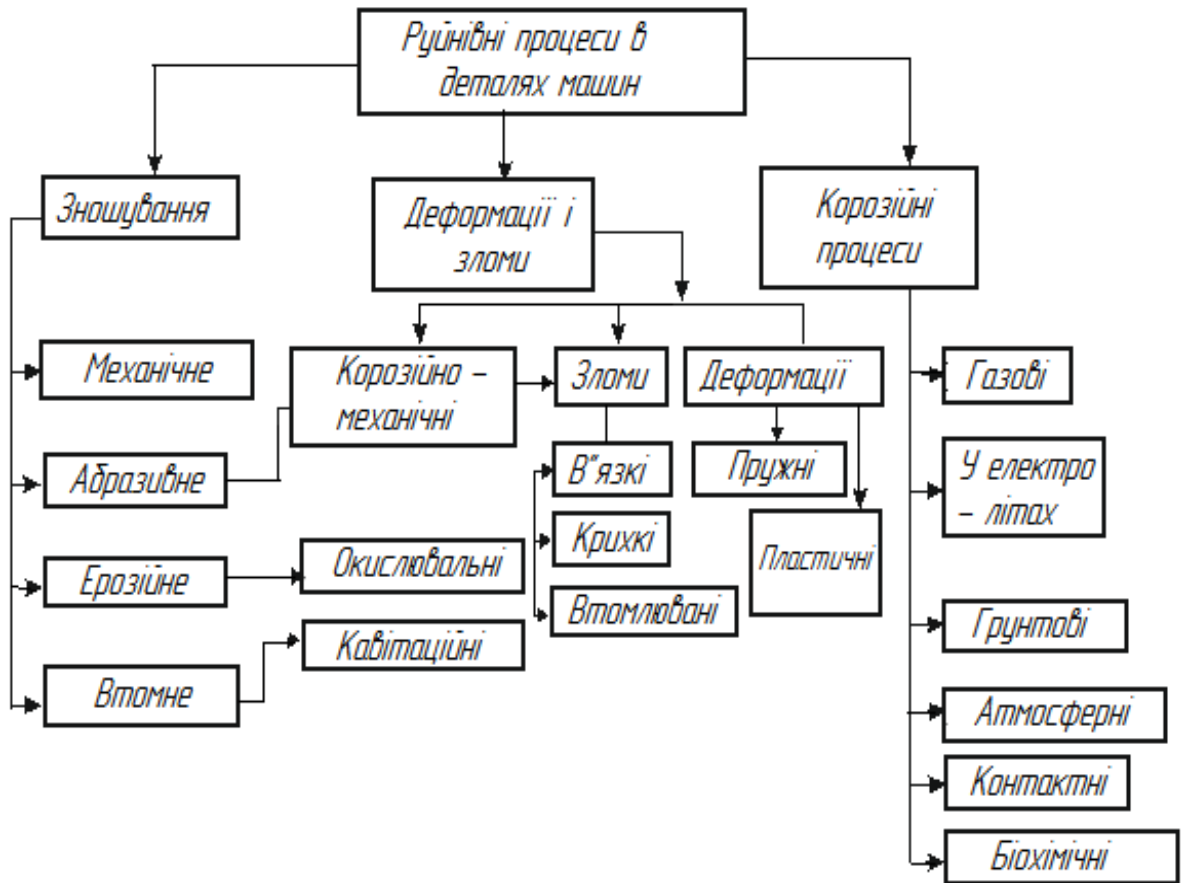


Рисунок Б.2 – Класифікація руйнівних процесів в деталях ЗТ

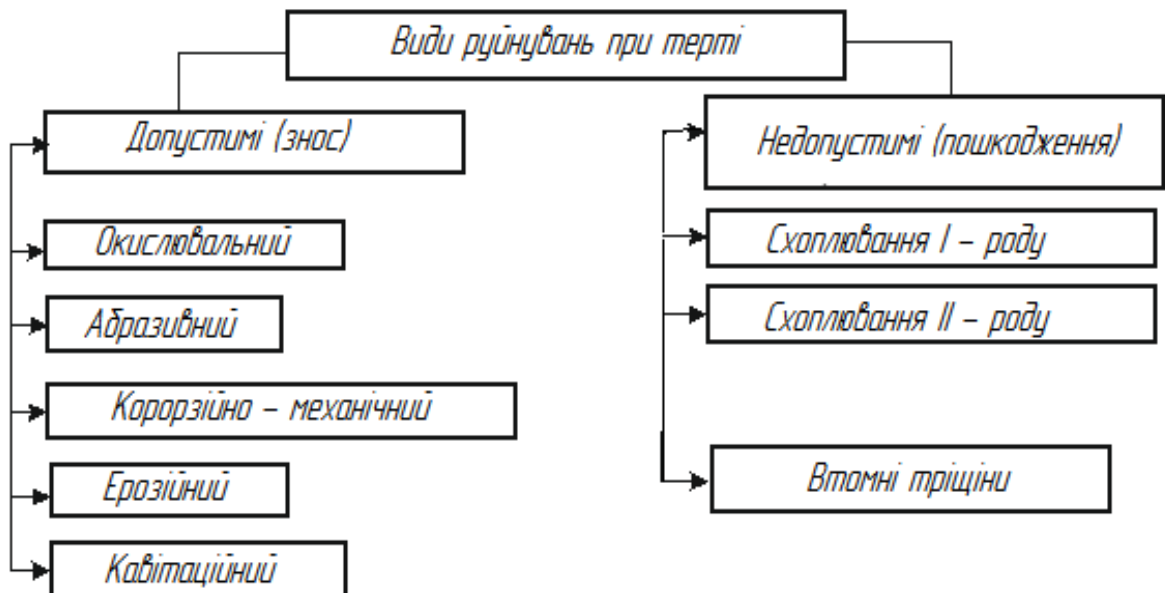


Рисунок Б.3 – Види руйнувань при терті: допустимі (знос) і неприпустимі пошкодження

Додаток Б.2 Експлуатаційні відмови і пошкодження ЗТ

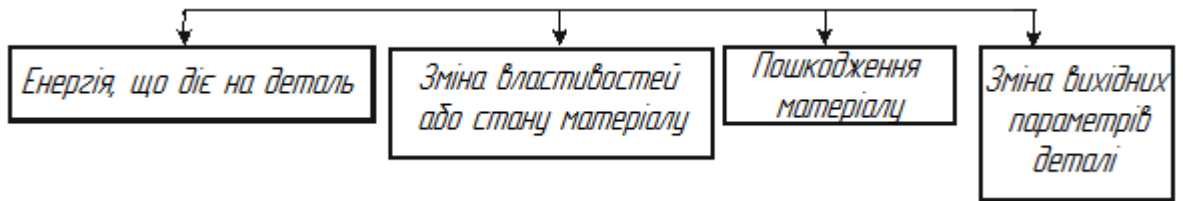


Рисунок Б.4 – Схема процесу виникнення відмов деталі ЗТ

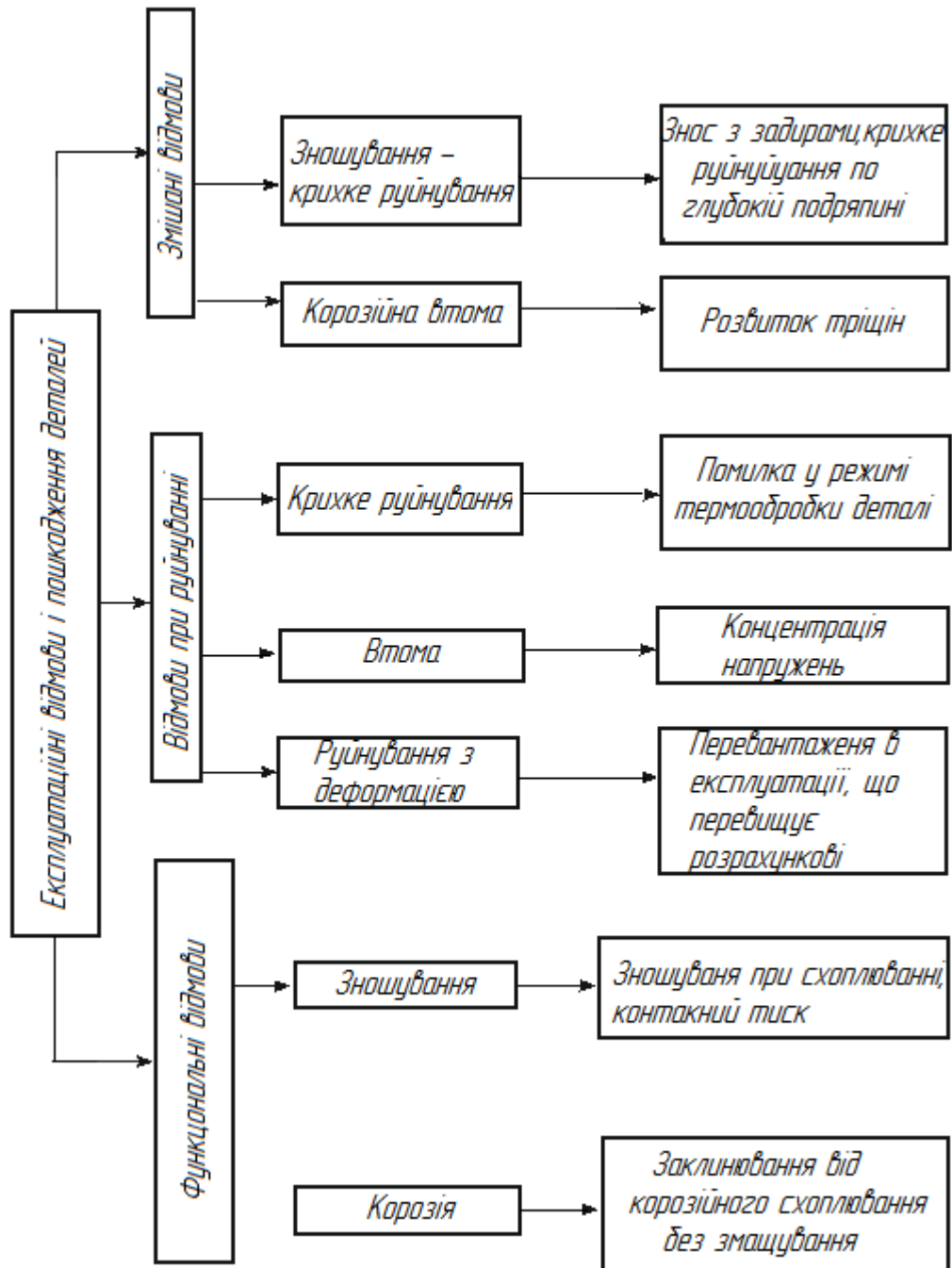


Рисунок Б.5 – Класифікація експлуатаційних відмов і пошкоджень деталей

Додаток Б.3 Технологічні методи відновлення деталей ЗТ

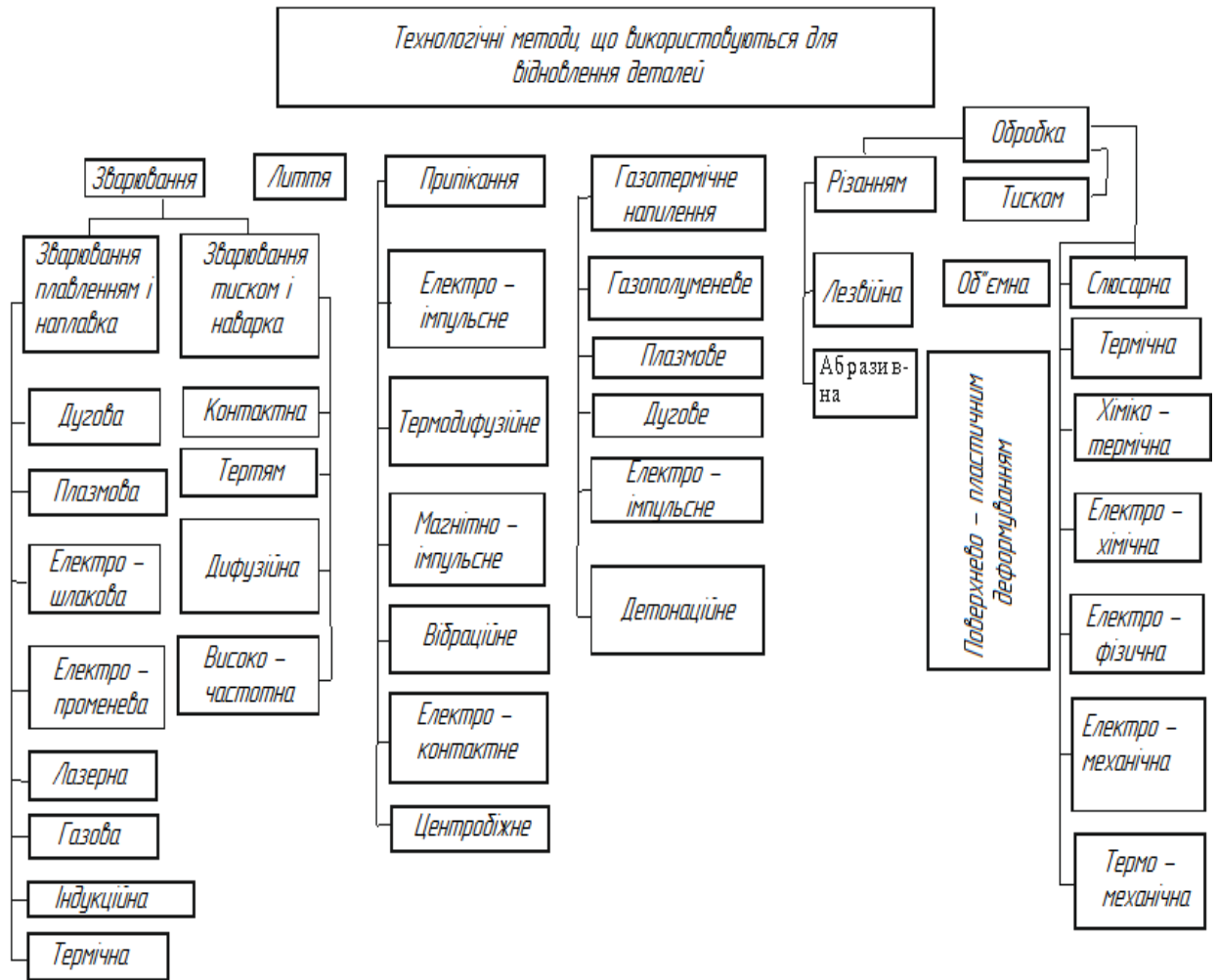


Рисунок Б.6 – Технологічні методи відновлення деталей засобів транспорту

Додаток В

Сучасні апарати для нанесення покриття

Таблиця В.1 – Характеристика сучасного обладнання для ЕДН

Обладнання, фірма, країна	Робочий струм, А	Матеріал	Продуктивність, кг/год
Agespray, SNMI, Франція	200 – 800	Сталь, алюміній, цинк	7 – 30; 3,5 – 15; 16 – 65
VT-600, Colmonoy, США	До 500	Сталь, алюміній, цинк	25,4; 13,6; 70,7
ELMET-P2, RUKOV, Чехія	200 – 400	Алюміній, цинк	25; 66
LD/U2, OSU, Німеччина	До 200	Сталь, алюміній, цинк	9,5 – 10,2; 6; 20
LD/U3, OSU, Німеччина	До 300	Сталь, алюміній, цинк	14,2-15,3; 9; 30
LD/S2, OSU, Німеччина	до 1400	Сталь, алюміній, цинк	65,8; 37,1; 140
ЕМ-14, Росія	До 320	Сталь, алюміній, цинк	10; 8; 30
ЕМ-14М, Росія	50 – 400	Алюміній, цинк	до 12,5; до 40
ЕМ-17, Росія	50 – 400	Сталь, алюміній, цинк	до 18; до 12; до 40
ЕДМ-5, Росія	До 400	Сталь, алюміній	до 20; до 10
ЕМГ-2, Україна	До 400	Сталь	18,8
ЕМП-1, Україна	До 300	Сталь, алюміній	24; 14
УСЗМ-2М, Україна	до 400	Сталь	до 20
РЕ-2, Польща	до 300	Сталь, алюміній	12; 8
АДМ-8, Білорусь	до 500	Сталь, алюміній, цинк	30; 18; 40
АДМ-10, Білорусь	до 380	Сталь, алюміній, цинк	18,4; 6,5; 16,8

Додаток Д

Характеристика обладнання, що використовується для напилення

1. Призначення

Обладнання для електродугового напилення призначено для нанесення зносостійких і антикорозійних покриттів з дротяних матеріалів способом термічного напилення. Включення установки здійснюється від трьох фазної мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Для роботи установки необхідно наявність мереж підведення стисненого повітря тиском від 0,45 до 0,6 МПа, пропану тиском від 0,3 до 0,45 МПа, а також джерела струму «ВДУ-506».

2. Технічна характеристика

Таблиця Д1 – Технічні характеристики установки

Характеристика	Значення
Матеріал дроту	сталь, ніхром, латунь, мідь, молібден, алюміній, цинк, бронза
Діаметри дроту, мм	1,6 ÷ 2,2
Швидкість подачі дроту, м / хв	0 ÷ 6,3
Регулювання швидкості	плавне
Електродвигун приводу подачі дроту	MAXON
Номінальна потужність, КВт	0,09
Номінальна частота обертання, хв ⁻¹	8000
Підвод струму на електродні дроти	
Напруга, В	17 ÷ 40
Робочий струм, А	100 ÷ 380
Робочий тиск газів, МПа	
Пропан	0,3 ÷ 0,45
Повітря	0,45 ÷ 0,6
Загальна витрата повітря при 6 атм., м ³ / год	не більше 0,011
Витрата пропану, м ³ / хв	не більше 60
Габаритні розміри електродугового апарату, мм	290x255x75
Рівень звуку на відстані 0,5-1,0 м від апарату,	не більше 130

3. Склад обладнання

До складу обладнання для ЕДН входять основні складові частини, що наведені в табл. Д.2.

Таблиця Д.2 – Комплект установки ЕДН-10

Найменування	Кількість
Апарат для ЕДН АДН-10	1
Пульти керування	1
Газовий блок	1
Комплект шлангів і жгутів	1
Джерело струму «ВДУ-506»	У комплект поставки не входить

4. Принцип роботи апарату для ЕДН

В основі роботи апарату для ЕДН лежить процес плавлення дротів електричною дугою і розпилення розплавленого металу високошвидкісним струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші.

Сутність цього процесу полягає в тому, що на два дроти, які виконують роль електродів, подається напруга. В результаті зближення дротів між ними виникає електрична дуга і відбувається її плавлення. Відпрацьовані гази пропано-повітряної суміші через розпилювальне сопло здувають частки розплавленого металу з торців дротів, підхоплюють їх, розганяють до високої швидкості і забезпечують доставку до поверхні відновлюваної деталі.

Апарат для електродугового напилення АДН-10 (рис. Д.1) складається з черв'ячного редуктора 1б до корпусу якого кріпляться: 1 - електродвигун з циліндричним редуктором; 2 - кронштейн механізму притискання роликів; 3 - важелі з роликами для притискання; 4 - передні і задні направляючі; 5 - піддон картера, на якому через ізолятор 11 розміщені дроти для підведення струму 6, виконані у вигляді трубок для подачі стисненого повітря для утворення пальної суміші і, одночасно, охолодження деталей металізатора. На лівому струмопроводі розміщений трійник 11(рис Д.1).

До піддону прикріплений кронштейн, на який одягається ручка 7, або за допомогою якого апарат може кріпитися, наприклад, до супорта верстата.

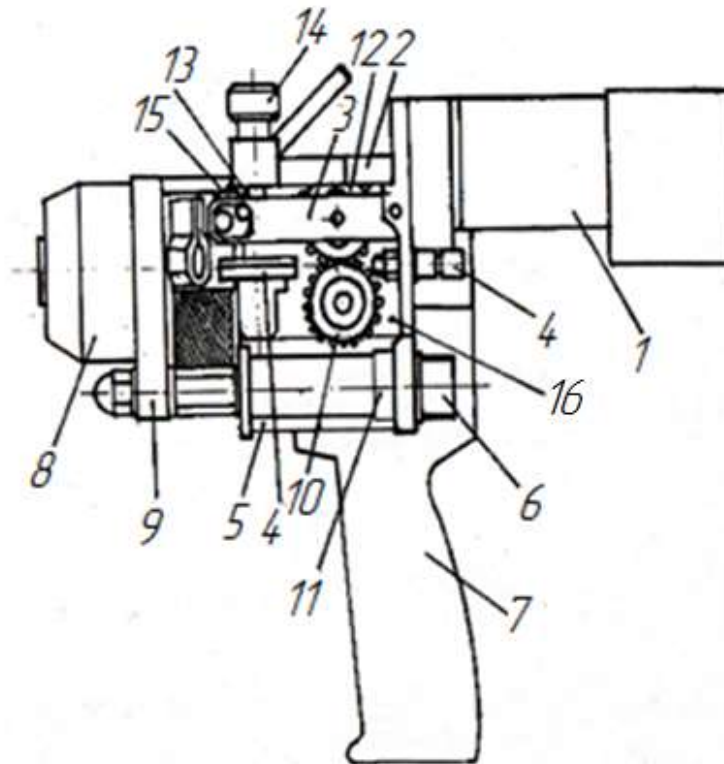


Рисунок Д. 1 – Загальний вигляд апарату для електродугового напилення

Розпилювальна головка апарату 8 розташована на проміжній розподільній плити (панелі) 9, яка закріплена на струмопроводі 6 піддону картера.

Черв'ячний редуктор 16 служить для передачі обертання від валу електродвигуна 1 роликам 10 апарату для напилення. На корпусі редуктора кріпляться деталі апарату для напилення.

Розпилювальна головка 8 (рис. Д.1) служить для формування струменя розплавленого металу і складається з камери згорання (рис. Д.2) і вузла для підведення струму 8 і 9 (рис. Д.2). Камера згорання служить для отримання високошвидкісного струменя газів продуктів згорання. Камера складається з корпусу 1, сопла 2, розподільника 3, відбивача 4, керамічної перфорованої втулки 5 і жиклерів 11.

У корпусі розподільника 3 за допомогою втулки і гайки закріплена свічка запалювання (рис. Д.3.).

Стиснене повітря і горючий газ подаються по лівому струмопроводу в камеру згорання через проміжну розподільну плиту.

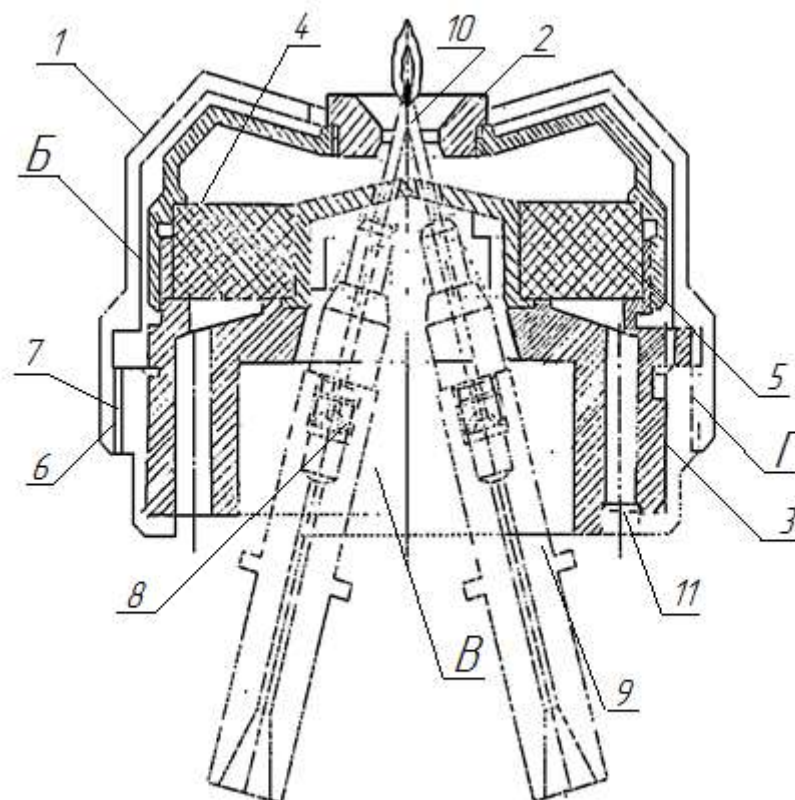


Рисунок Д.2 – Схема головки для розпилювання апарату АДН-10



Рисунок Д.3 – Кріплення свічки запалювання в розподільнику камери згорання

Змішування горючого газу з повітрям відбувається в змішувальному пристрої (трійнику). Підпалювання суміші здійснюється за допомогою високовольтного розряду, що відбувається між електродами свічки запалювання. Герметичність з'єднання забезпечується гумовими кільцями,

одягненими на жиклери і які знаходяться в канавках розподільника. Охолодження камери згорання повітряне. Охолоджуюче повітря подається по правому струмопроводі в канали проміжної панелі і звідки воно через дві повітряні трубки потрапляє у внутрішню порожнину. В розподільній головці через периферійні отвори Г камери згорання воно надходить в порожнину Б між дефлекторною гайкою 6 і корпусом камери згорання 1 та через щілину між дефлекторною гайкою 7 і соплом 2 виходить назовні (рис. Д.2)

Притиснення дротів здійснюється роликми 12 (рис. Д.1), розташованими в пазах 3 (рис. Д.1). Осі обертання притискних роликів ізольовані від важеля текстолітовими втулками. Притиснення роликів забезпечується пружинами 13, а зусилля притиснення регулюється гвинтами 14, розташованими на кронштейні механізму притиску 2. Для зменшення ковзання дроту притискні ролики мають зубчастий вінець і за допомогою додаткових шестерень отримують примусове, синхронне з подаючими роликми обертання. Віджимання важелів здійснюється поворотом важелів 15 з ексцентриками.

Додаток Е

Матеріали для відновлення

Таблиця Е.1 - Зварювальні і наплавочні дроти

Дроти	Хімічний склад, %				
		Мп	Si	Сг	Інші
Св-08	До 0,1	0,35-0,60	До 0,03	До 0,15	Ni до 0,3
Св-08А	До 0,1	0,35-0,6	До 0,03	До 0,12	Ni до 0,25
Св-10Г2	До 0,12	1,5-1,9	До 0,06	До 0,2	Ni до 0,3
Св-08ГС	До 0,1	1,4-1,7	0,6-0,85	До 0,2	Ni до 0,25
Св-08Г2С	0,05-0,11	1,8-2,1	0,70-0,95	До 0,2	Ni до 0,25
Св-12ГС	До 0,14	0,8-1,1	0,6-0,9	До 0,2	Ni до 0,3
Св-18ХГС	До 0,22	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	Ni до 0,3
Св-07Х18Н9ТЮ	До 0,09	До 2,0	До 0,8	17-19	Ni до 8-10 Ti 1,0-1,4 Al 0,6-0,9
Нп-30	0,27-0,35	0,5-0,8	0,17-0,37	До 0,25	Ni до 0,3
Нп-40	0,35-0,45	0,5-0,8	0,17-0,37	До 0,25	Ni до 0,3
Нп-50	0,45-0,55	0,5-0,8	0,17-0,37	До 0,25	Ni до 0,3
Нп-65	0,6-0,7	0,5-0,8	0,17-0,37	До 0,25	Ni до 0,3
Нп-80	0,75-0,85	0,5-0,8	0,17-0,37	До 0,25	Ni до 0,3
Нп-65Г	0,6-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37	До 0,3	Ni до 0,3
Нп-30ХГСА	0,27-0,35	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	Ni до 0,4
Ш-40Х2Г2М	0,35-0,43	1,8-2,3	0,4-0,7	1,8-2,3	Ni до 0,4 Мо 0,8-1,2
Нп-50ХФА	0,46-0,54	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	Ni до 0,4 0,1-0,2
Нп-Х20Н80Т	До 0,12	До 0,7	До 0,8	19-23	Основа Ti 0,15-0,4
Нп-40Х13	0,35-0,45	До 0,8	До 0,8	10-12	-

- Примітка: 1. Сталь Св-08, Св-08Г2С та ін. - низьковуглецеві; сталь Св-08Г2С під запресування підшипників;
2. Сталь 30ХГСА, 20Х13, 65Г і ін. - середньовуглецеві; сталь 30ХГСА під запресування шестерень, сталь 20Х13, 65Г під сальники;
3. 40Х13 - вуглецева (колінчастісті вали та ін. деталі).

Таблиця Е.2 – Характеристики поширених марок сталевих дротяних матеріалів

Марка дроту	Хімічний склад	Призначення	Твердість після напилення, НV
Св-08	С – 0,08...0,1%	Зварювання низьковуглецевих сталей	250...300
Св-08Г2С	С – 0,08...0,1%, Mn - 1,5...2,0%, Si - 0,8...1,2%	Зварювання низьковуглецевих сталей	250...300
Нп 40	С – 0,37...0,42%	Зносостійке наплавлення деталей	300...350
Нп-60	С – 0,57...0,62%	Зносостійке наплавлення деталей	350...400
65Г	С – 0,63...0,68%, Mn – 0,8...1,2%	Зносостійке наплавлення деталей	350...400
У8	С – 0,76...0,82%	Зносостійке наплавлення деталей	360...400
20Х13	С – 0,18...0,22%, Cr – 11...13%	Зносостійке наплавлення деталей	360...420
ПП-ТП-1(порошковая)	С – 0,67%, Cr - 3,58%, Ni - 2,33%, Si - 0,27%, Mn - 0,42%, Al - 2,08%	Електродугове напилення і наплавлення деталей	400...450
НП-4 (порошковая)	Система легирования Fe-C-B-Cr	Електродугове напилення і наплавлення деталей	400...450

Примітка: 1. ПП-ТП-1 - порошковий дріт для відновлення і зміцнення навантажених деталей різного призначення і для підвищення твердості робочих поверхонь деталей.

2. У всіх дротах можливо вміст домішок S до 0,015% і P до 0,035%.

Таблиця Е.3 – Марки і хімічний склад сталевих дротів, що використовуються для електродугового напилення

Матеріал	Хімічні елементи, %							
	C	Si	Mn	Cr	Al (Ti)	Ni (Ni+Cu)	Fe	Mo
*Св-08	0,08	0,1	0,45	0,1	-	0,15	Осн.	
20X13	0,16 – 0,25	≤ 0,8	≤ 0,8	12,0-14,0	-	-	Осн.	
*40X13	0,36 – 0,45	≤ 0,8	≤ 0,8	12,0-14,0	-	-	Осн.	
30XГСА	0,28 – 0,34	0,9 – 1,2	0,8 - 1,1	0,8-1,1	-	-	Осн.	
30X20НМ	0,26 – 0,35	0,8	0,8	19,0-21,0	-	0,8-1,2	Осн.	0,8 - 1,2
12X18Н10Т	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 2,0	17-19	0,8	9-11	Осн.	
ПП-ТП-1	0,67	0,27	0,42	3,58	2,08	2,33	Осн.	
65Г	0,62 – 0,7	0,17 – 0,37	0,7 – 1,0	-	-	-	Осн.	
ШХ15	0,95 – 1,05	0,17-0,37	0,2 – 0,4	1,3-1,65	-	≤ 0,5	Осн.	
50ХФА	0,48 – 0,56	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1	-	-	Осн.	

- Примітка: 1. Сталь 30X20НМ - аустенітна жароміцна;
2. Сталь 12X18Н10Т - нержавіюча для антикорозійного захисту очисних споруд, для деталей, що працюють в контактi з харчовими середовищами;
3. Сталь 30X20НМ для нанесення підшару з метою підвищення міцності зчеплення електродугових покриттів з поверхнею відновлюваних деталей;
4. Марки дротів зі знаком «*» були обрані для експериментальних зразків з електродуговими покриттями.

Додаток Ж

Принципова електрична і структурна схеми установки «Елітрон-22»
для ЕІЛ і конструкції електромагнітних збудників

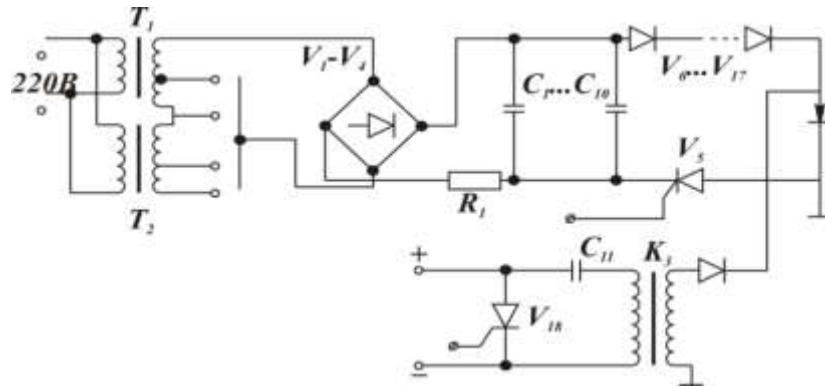


Рисунок Ж.1 – Принципова електрична схема генератора робочих імпульсів установки «Елітрон-22»: T_1 - T_2 – трансформатори джерела живлення; V_1 - V_4 – випрямлячі; R_1 – баластний опір; C_1 - C_{10} – накопичувальна ємність; V_5 – тиристор розрядного ланцюга; захисні діоди; K_3 - катушка запалювання

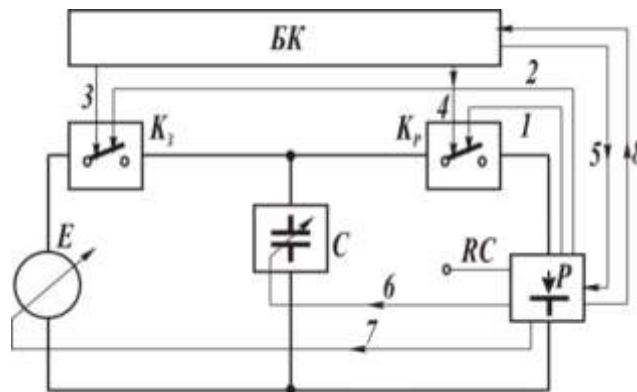


Рисунок Ж.2 – Структурна схема генератора імпульсів струму для ЕІЛ з ємнісними накопичувачами: E - кероване джерело постійної напруги; K_3 , K_p - комутуючі елементи зарядного і розрядного ланцюга відповідно; C - керована накопичувальна ємність; BK - блок керування комутуючими елементами і приводом електрода-інструменту; P -міжелектродний проміжок.

Кінематика електрода повністю визначає частоту розрядів і тривалість їх контактування. В якості комутуючих елементів для зарядного і розрядного

ланцюгів використовуються транзистори і тиристори. Відомі такі схеми генераторів:

- комутація здійснюється в зарядному ланцюзі;
- комутація здійснюється в розрядному ланцюзі;
- комутація здійснюється в обох ланцюгах одночасно.

Схеми реалізуються в залежності від відносної відстані між електродами, наявності або відсутності контакту між ними і інформації, яка характеризує взаємодію між електродами. На схемі (рис. Ж.2) дане рішення характеризується стрілками 1 і 2. Для чистової обробки використовуються високочастотні генератори, в яких елементи мають незалежне від міжелектродного проміжку управління, яке здійснюється автономним блоком управління БУ з розділом в часі за ланцюгами (стрілки 3 і 4). При цьому можуть використовуватися електроди, привід яких управляється імпульсами від блоку БУ (стрілка 5), синхронізованими з імпульсами, які приходять до елемента. В установці «Елітрон-22» використовується електромагнітний збудник. Принцип дії електромагнітних збудників заснований на періодичному притягненні феромагнітних тіл, які включені в змінне магнітне поле. Під дією змінного струму до електромагніту 1 притягується яркір 2 (рис. Ж.3).

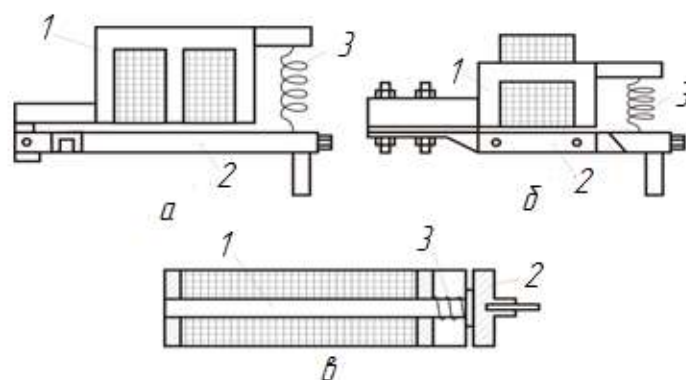


Рисунок Ж.3 – Конструкції електромагнітних збудників: Ш-х подібний (а); П-подібний (б) і соленоїдний (в)

На проміжку часу, коли струм електромагніта послабшає, пружина 3 повертає яркір в початкове положення, в результаті цього яркір здійснює

коливальний рух з частотою, яке дорівнює подвійній частоті мережі. Для отримання коливань збудника з частотою, рівній частоті мережі, використовують такі методи: включення обмотки електрода через діод; використання постійних магнітів і обмоток, які підмагнічують постійним струмом; послідовне включення двох джерел напруг (змінного і постійного); двотактні збудники з діодними роздільними катушками; субгармонічний режим роботи. Останні дозволяють отримувати низьку частоту. Магнітний ланцюг збудника може містити сердечник Ш-х подібної, П-подібної або соленоїдної форми (рис. Ж.3.). Якір 2 збудника (рис. Ж.3) може бути виконаний у вигляді єдиної деталі з конструкційної сталі або з листів трансформаторної сталі. В останньому випадку він володіє меншими втратами електроенергії на гістерезис і вихрові струми, а тому, піддається меншому нагріванню. Розрізняють віброзбудник з поступальним, шарнірно-поворотним і гнучким закріпленням якоря. Описані конструкції збудників створюють вібрації частотою 100 Гц.

Для роботи в високочастотному діапазоні створені спеціальні вібратори з підвищеною частотою вібрації. Для збільшення частоти вібрації необхідно зменшити момент інерції, розміри і масу якоря. З цією метою використовуються полегшені якорі з легких сплавів із феромагнітними вставками трапецеїдальної і паралелоїдальної форм (рис. 3.4, а, б). Такий якір являє собою балку з рівномірно розподіленими і зосередженими масами електрода з електроутримувачами і феромагнітної вставкою. Маса пружини при цьому не враховується в зв'язку з її малими розмірами. Віброзбудник з віссю кочення якоря в центральній частині траверси (рис. Ж.4,д) використовуються при легуванні внутрішніх поверхонь деталей.

В діапазоні вібрацій до 300 Гц можливе живлення вібратора від джерела трифазного змінного струму промислової частоти. Магнітопровід системи збудження такого вібратора містить три фазних стрижня і один нульовий (рис. Ж.4, в). На фазні стрижні надіті катушки, які підключені до трифазного ланцюга і з'єднані зірочкою без нульового проводу. Нульовий

стрижень служить для створення електромагнітної сили, що збуджує.

Для роботи вібровозбуджувачів в більш високочастотному діапазоні (до 1000 Гц і вище) використовують їх живлення від електромагнітних перетворювачів частоти і напівпровідникових генераторів. Завдяки мінімальним габаритам і вазі, високому ККД і відсутності деталей, що обертаються, останні найбільш перспективні. Використання багатофазної вібрації (системи декількох зрушених по фазі механічних коливань) не збільшує частоту коливання кожного електрода окремо, а дозволяє підвищити частотний діапазон роботи генератора за рахунок перерозподілу розрядів між ними. Використання синхронної роботи для однофазних вібровозбуджувачів вимагає складної форми багатофазного генератора для їх живлення. Цих недоліків позбавлений парофазний вібровозбуджувач з двома якорями і загальною системою збудження (рис. Ж.4, г). Вставки обох якорів розташовані таким чином, що під дією електромагнітного збуджувача їх рух направлено в протилежні сторони.

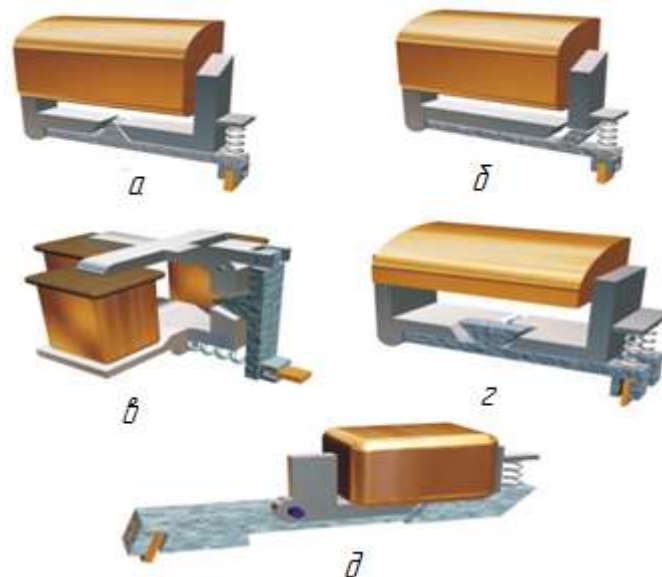


Рисунок Ж.4 – Високочастотні збуджувачі вібрації: а, б - відповідно з трикутною і паралелоїдальною феромагнітною вставками якоря; в - з використанням третьої гармоніки; г - парофазний; д - для легування внутрішніх поверхонь

Додаток З

Вимоги до обладнання для ПА.

Основні технічні дані та принципова схеми установки

Таблиця 3.1 – Основні вимоги до обладнання ПА

Вимоги до обладнання	Умови забезпечення
Можливість отримання якісних іонно-азотованих шарів на виробах різної форми з різних металів	Незалежне регулювання витрати кожного з компонентів газової суміші ($N_2 + H_2 + Ar + CH_4$ (пропан)) і тиску у вакуумній камері
Економічність у використанні електроенергії, робочих газів, охолоджуючої води	Теплозахисний екран Застосування імпульсного режиму азотування; Регулювання швидкості відкачки вакуумного насоса
Зручність експлуатації	Модульна конструкція установки Автоматизоване управління Змінна оснащення для обробки різних деталей
Надійність	Наявність незалежного апаратного блокування при виникненні позаштатних ситуацій; застосування виконавчих пристроїв, блокується при відключенні харчування або управління;
Економічна безпека	Відмова від використання аміаку в якості робочого газу при азотуванні Відмова від використання сполук, що містять хлор при знежирюванні деталей

Принципова схема установки для іонного азотування в імпульсному режимі представлена рис. 3.1. Принцип роботи установки полягає в наступному: у вакуумній ємності 1 за допомогою спеціальної підвіски 2 підвішуються оброблювані деталі 3, на які подається негативний потенціал. Закриття кришки вакуумної ємності 1 контролюється датчиком контролю закриття кришки 4. У систему охолодження вмонтований датчик контролю наявності води 10. При відсутності води в системі охолодження або при незакритті вакуумної ємності кришкою на блок живлення 9 надходить блокувальний сигнал і струм розряду не подається до вакуумної ємності. Вимірювання температури і тиску всередині вакуумної ємності відбувається

за допомогою манометричного термопарного перетворювача типу ПМТ-2 (6) і іонізаційно-термопарного вакуумметра типу ВІТ-2 (5) відповідно. Потім відкривають вакуумну ємність і дістають оброблені деталі.

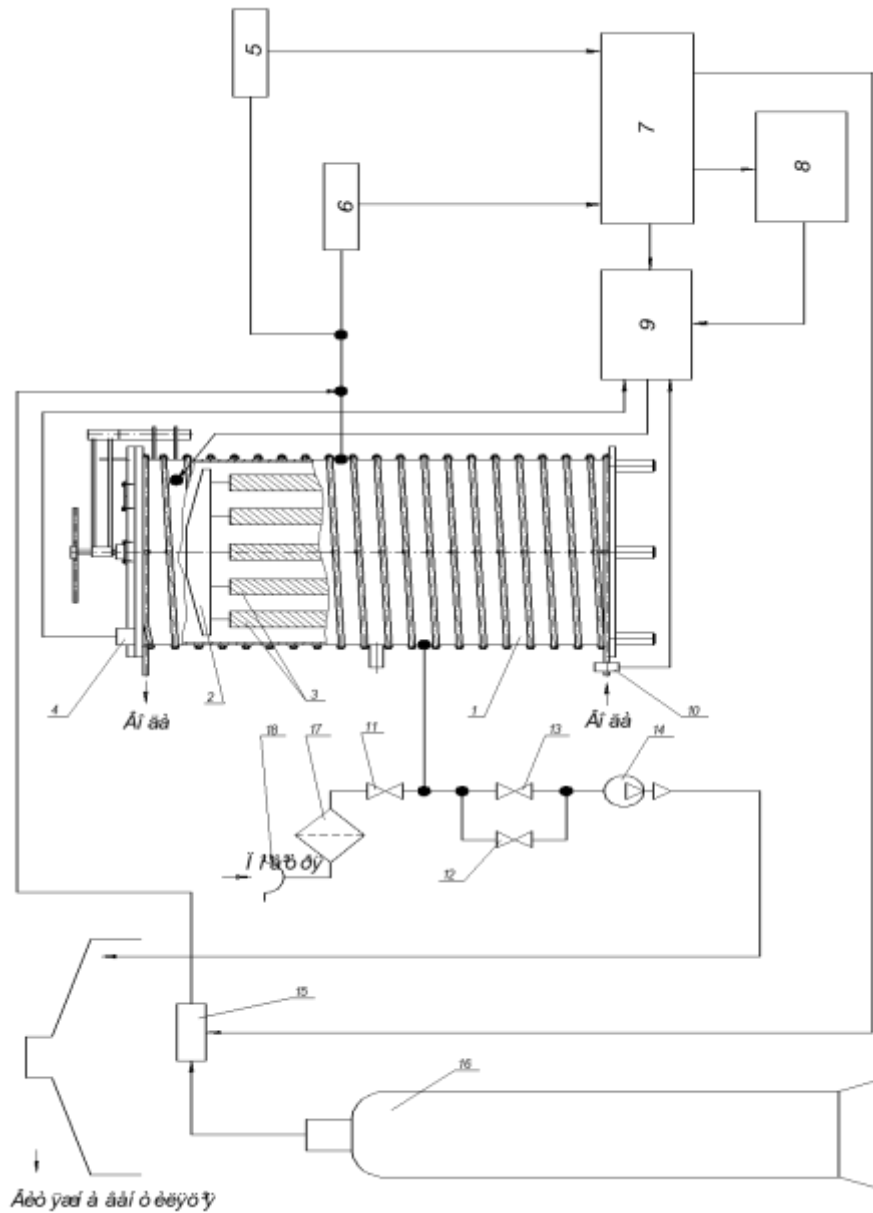


Рисунок 3.1 – Принципова схема установки для іонного азотування в імпульсному режимі: 1 – ємність вакуумна; 2 – підвіска; 3 – оброблювані деталі; 4 – датчик контролю закриття кришки; 5 – датчик тиску; 6 – датчик температури; 7 – блок контролю і регулювання; 8 – блок завдання температури; 9 – блок живлення; 10 – контроль води; 11 – клапан повітряний; 12 – клапан попередньої відкачки; 13 – клапан вакуумної відкачки; 14 – форвакуумний насос; 15 – клапан азоту; 16 – балон з газом; 17 – повітряний фільтр; 18 – забірник повітря

Результати вимірювання надходять в блок контролю і регулювання 7, звідки оброблений сигнал направляється в блок живлення 9, датчик температури 8 і клапан напуску азоту 15. При цьому здійснюється регулювання робочої напруги блоку живлення і відбувається управління температурним полем процесу азотування. Відкачування атмосфери з вакуумної ємності відбувається вакуумним насосом 14 через клапан попередньої відкачки 12 і клапан вакуумної відкачки 13. Клапан попередньої відкачки служить для запобігання виходу з ладу вакуумного насоса і попередньої відкачки атмосфери з вакуумної ємності до тиску 10-15 мм. рт. ст. По досягненню певного тиску відкривається клапан вакуумної відкачки. Для створення потрібної робочої атмосфери в вакуумній ємності подається робочий газ (азот) з балона 16. Кількість газу регулюється клапаном напуску азоту 15. Після закінчення процесу азотування в вакуумну ємність через повітрязабірник 18 повітряний фільтр 17 і клапан напуску атмосфери 11 подається атмосферне повітря до досягнення нормального атмосферного. Основні технічні дані установки для ПА наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні технічні дані установки для ПА

Основні параметри і характеристики	Значення параметрів і характеристик
Розміри робочої камери:	
Діаметр	600
висота, мм	1200
Розміри оброблюваних деталей:	
діаметр, мм	до 500
довжина, мм	до 700
Максимальна маса завантаження, кг	400
Тривалість циклу зміцнення деталі, годину.	0,5 ... 24
Температура азотування, ° С	300...900
Товщина азотированного шару, мм	до 0,8
Максимальні витрати робочого газу, л / год.	30
Максимальна споживана потужність, кВт	20
Напруга мережі, В	220
Витрати води для охолодження, м ³	2

Додаток И

Результати дослідження властивостей відновлених поверхонь

Додаток И.1. Результати визначення адгезійної міцності системи «відновлювана поверхня - покриття» і триботехнічних випробувань відновлених поверхонь

Дослідження адгезійної міцності і механічних властивостей системи «відновлювана поверхня - покриття» проводили в лабораторії 6.1 (7.1) ПМіц. імені Г.С. Писаренко. Визначено, що при отриманні покриттів комбінованим методом зі сталей мартенситного 40X13 і аустенітного класу X18H10T, що включає ЕІЛ, ЕДН і ПА, вони характеризувалися адгезійною міцністю 110 МПа. При цьому їх когезійна міцність дорівнювала 230 МПа. Межа витривалості підвищилася на 20% відповідно до випробувань на високочастотну витривалість.

Для проведення триботехнічних випробувань покриття наносили на внутрішню поверхню сектора кільцевого зразка (розділ 3) і випробували в умовах тертя ковзання по зовнішній поверхні кільцевого контртіла зі сталі 45, яка була термооброблена і мала твердість HRC42.

Перед випробуванням внутрішні поверхні секторів діаметром 50 мм і зовнішні поверхні контртіла діаметром 50 мм шліфували алмазними колами до шорсткості $R_a = 0,64$ мкм.

Випробування проводилися по методиці, представленій у розділі 3, п.п.3.13 при швидкості ковзання $V = 0,8$ м/с і навантаженнях від 2 МПа до 10 МПа. Перед випробуванням зразки приробляли - шлях тертя 1 км, потім проводили триботехніческие випробування - шлях тертя 9 км. У процесі проведення експерименту вимірювалися лінійний знос і момент тертя через кожні 3 км.

Зносостійкість оцінювалася за середнім значенням інтенсивності зносу

$$\bar{i} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{l_i} \quad (\text{И.1})$$

де I_i – лінійне зношування при i - тому вимірі; l_i – шлях тертя.

В якості характеристики тертя використовували середнє за часом значення коефіцієнту тертя:

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n \times P} \quad (\text{И.2})$$

де F_i – сила тертя в момент t_i ; n – кількість вимірів; P – навантаження, МПа.

Результати експерименту представлені в табл. И.1.

Таблиця И.1 – Триботехнічні характеристики поверхонь, відновлених комбінованим методом

Покриття	P = 2МПа			P = 4МПа			P = 6МПа			P = 8МПа			P = 10МПа		
	i_n	i_k	μ	i_n	i_k	μ	i_n	i_k	μ	i_n	i_k	μ	i_n	i_k	μ
Сталь 45 без покриття		10	0,19		10	0,20		11	0,21		12	0,22		14	>0,4
40X13 при розпиленні повітрям	12	9	0,21	10	8	0,22	9	7	0,23	8	6	0,25	7	5	відш
40X13 при розпиленні повітрям	16	8	0,20	15	7	0,22	14	6,5	0,24	13	6	0,25	12	5,5	0,26
40X13 при розпиленні продуктами згорання	14	8	0,20	13	7,5	0,21	12	7	0,22	11	6	0,24	10	5	0,25
40X13 при розпиленні продуктами згорання пропано-повітряної суміші	18	7	0,17	16	6,5	0,18	15	6	0,20	14	5,5	0,21.	13	5	0,22

Примітка: i_n = інтенсивність зносу покриття; i_k = інтенсивність зносу контртіла; одиниця виміру $i \cdot 10^{-9}$ мкм/км; прочерк - знос контртіла не зафіксовано; СХВ - захоплювання в процесі випробувань; відш. – відшарування покриття.

Триботехнічні характеристики покриттів зі сталі 40Х13 і контртіла порівнянні зі сталлю 45. У порівнянні зі сталлю 45 кращими триботехнічними властивостями характеризуються покриття з дротяної сталі 40Х13 при її розпилюванні продуктами згоряння пропано-повітряної суміші і обробці ПА. В якості базової використовувалася трибологічна система Ст.45-МС20-Ст.45. У всіх дослідах мастило поновлювалася через кожні 100 м шляху тертя. Отримана при цьому величина зносу контртіла на порядок менше ніж в системі Ст.45-МС20-Ст.45.

Додаток К

Розрахунок оптимальних параметрів комбінованої технології
відновлення

Таблиця К.1 - Результати пошуку оптимального об'єкту

		Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
Критерії		$\sigma_{зч}$, МПа	Jh, мкм/км	$\sigma_{зч}$, МПа	Jh, мкм/км	$\sigma_{зч}$, МПа	Jh, мкм/км
Цілі		max	max	max	max	max	max
Вагові коефіцієнти		0,5	0,5	0,8	0,2	0,2	0,8
Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3			
Об'єкти	Ефективність	Об'єкти	Ефективність	Об'єкти	Ефективність		
14	1	14	1	14	1		
9	0,941074435	9	0,925464401	9	0,9627322		
1	0,813661002	1	0,865629038	11	0,776393202		
4	0,656407865	3	0,776393202	1	0,773308825		
3	0,646446609	7	0,731258075	4	0,70892918		
11	0,646446609	12	0,683772234	6	0,701857603		
7	0,627322004	4	0,610912749	10	0,565386506		
12	0,604715292	11	0,552786405	3	0,552786405		
6	0,528595479	5	0,551236266	7	0,54661765		
2	0,5	2	0,5	12	0,539022777		
5	0,419650488	13	0,440983006	2	0,5		
10	0,384799039	6	0,403715206	15	0,367544468		
13	0,362622561	8	0,254644008	5	0,312815729		
16	0,25	16	0,25	13	0,292893219		
15	0,209430585	10	0,246305396	16	0,25		
16	0,150163414	15	0,078045554	8	0,057190958		

Міцність зчеплення $\sigma_{зч}$

Кількість головних ефектів – 18

Кількість взаємодій, які генеруються – 45

Кількість взаємодій, які визначаються – 0

Всього взаємодій і ефектів – 63

Типи взаємодій, які генеруються – 2;

Обмеження головного ефекту за ступенем – немає

Обмеження взаємодії за ступенем – 3

Таблиця К.2 - Список ефектів кандидатів

Ім'я / номер	Коефіцієнт	Ім'я / номер	Коефіцієнт
1/z1	0,178539	2/z1	0,452575
3/u1	0,143726	4/x2	0,0604523
5/z2	0,266438	6/u2	0,269498
7/x3	0,387504	8/z3	0,269712
9/u3	0,172726	10/x4	0,0804086
11/z4	0,476357	12/x5	0,279217
13/z5	0,0218396	14/u5	0,304601
15/x6	0,014793	16/z6	0,105245
17/u6	0,21351	18/x3x6	0,434632
19/x3x4	0,397364	20/x2x6	0,34864
21/x4x5	0,322748	22/x2x6	0,275288
23/x2x5	0,218319	24/x2x4	0,194281
25/x4x5	0,185782	26/x3x5	0,0977597
27/x4x6	0,02855	–	–

Мета: модель

Параметри, які впливають на формування структури моделі:

спосіб формування структури моделі – програмний;

алгоритм визначення списку кандидатів – на основі головних ефектів

Управління якістю моделі:

адекватність – так;

інформативність – ні;

значимість коеф. – ні;

частка участі – так;

обмеження max коеф. кореляції між ефектами – 0,4;

обмеження min коеф. кореляції ефектів з відгуком – 0,01;

обмеження мінімальної частки розсіювання – 0,005.

Отримана модель:

$$Y = 94,553717,2747z_4 - 22,4759x_3x_6 - 17,0532x_2z_6 - 3,92423u_5 + 1,41499u_6 + \\ + 8,66664x_1 - 16,1578z_1 - 16,0642x_6 - 4,37462u_3 - 9,99573x_4x_6$$

де:

$$x_1 = 1,86046 \times (x_1 - 1,6625);$$

$$z_1 = 1,90249 \times ((x_1^2) - 0,0811875 \times x_1 - 0,393185);$$

$$u_1 = 4,69867 \times ((x_1^3) - 0,139287 \times (x_1^2) - 0,670731 \times x_1 + 0,0228437);$$

$$x_2 = 0,8 \times (x_2 - 1,75);$$

$$z_2 = 1,66667 \times ((x_2^2) - 0,4);$$

$$u_2 = 3,96825 \times ((x_2^3) - 0,748 \times x_2$$

$$x_3 = 0,0163265 \times (x_3 - 138,75);$$

$$z_3 = 1,68391 \times ((x_3^2) - 0,055512 \times x_3 - 0,379425);$$

$$u_3 = 4,43393 \times ((x_3^3) - 0,035212 \times (x_3^2) - 0,736017 \times x_3 - 0,00770233);$$

$$x_4 = 0,285714 \times (x_4 - 30,5);$$

$$z_4 = 2,1995 \times ((x_4^2) - 0,269841 \times x_4 - 0,27551);$$

$$u_4 = 5,52748 \times ((x_4^3) - 0,442578 \times (x_4^2) - 0,506424 \times x_4 + 0,0475908);$$

$$x_5 = 0,25 \times (x_5 - 6);$$

$$z_5 = 1,88235 \times ((x_5^2) - 0,46875);$$

$$u_5 = 3,33333 \times ((x_5^3) - 0,85 \times x_5$$

$$x_6 = 2,53968 \times (x_6 - 2,35625);$$

$$z_6 = 1,85005 \times ((x_6^2) - 0,111206 \times x_6 - 0,378685);$$

$$u_6 = 4,29225 \times ((x_6^3) - 0,112694 \times (x_6^2) - 0,662431 \times x_6 + 0,000563312);$$

Аналіз адекватності моделі:

залишкова дисперсія – 8,65013;

дисперсія відтворення – 4,73438;

розрахункове значення F-критерію – 39,8717;

рівень значущості F-критерію для адекватності – 0,05;

рівень значущості F-критерію для ступенів свободи $\nu_1 = 10, \nu_2 = 5$;

табличне значення F-критерію для адекватності – 4,73506;

табличне значення F-критерію (відсутності повторні досліди) – 3,49004;
 стандартна помилка оцінки – 2,95083;
 стандартна помилка оцінки скоректована з урахуванням ступенів
 свободи – 4,66567;
 модель адекватна.

Аналіз інформативності моделі:

частка розсіювання пояснюється моделлю – 0,991585;
 введено регресорів (ефектів) – 11;
 коефіцієнт множинної кореляції – 0,995783
 коефіцієнт множинної кореляції скоректована з урахуванням ступенів
 свободи – 0,989425;
 F відношення для R – 58,9143;
 рівень значущості F-критерію для інформативності – 0,05;
 рівень значущості F-критерію для ступенів свободи – $v_1 = 10$, $v_2 = 5$;
 табличне значення F-критерію для інформативності – 4,73506;
 критерій Боксу і Веца для інформативності – 3;
 модель інформативна;
 інформативність моделі – добра;
 вільний член – 94,5537.

Таблиця К.3 - Статичні характеристики

Ім'я / номер коефіцієнта	Коефіцієнт регресії	Стандартна помилка коэф. регресії	Обчислення значень	Частка долі
z4	-17,2747	0,970262	-10,8285	0,226916
x3x6	-22,4759	0,737088	-11,5584	0,227374
x2z6	-17,0532	0,892341	-7,33196	0,135827
u5	-3,92423	1,17486	-2,28686	0,10098
u6	1,41499	1,08304	1,02869	0,112205
x1	8,66664	0,87735	6,19408	0,0800928
z1	-16,1578	1,33628	-7,66358	0,0306504
x6	-16,0642	1,51563	-6,5224	0,0360114
u3	-4,37462	0,929476	-3,91252	0,0196192
x4x6	-9,99573	0,894885	-3,6079	0,0219088

Таблиця К.4 – Мультиколінеарність

Ім'я / номер регресора	Мах. коефіцієнт кореляції	З яким регресором	Коеф. кореляції з відгуком
z4	0,340456	z1	0,476357
x3x6	0,215937	x1	0,434632
x2z6	0,154279	x4x6	0,275288
*u5	0,391026	u6	0,304601
*u6	0,391026	u5	0,21351
*x1	0,271856	u6	0,178539
z1	0,340456	z4	0,452575
*x6	0,339072	u5	0,014793
u3	0,0902535	x2z6	0,172726
*x4x6	0,154279	x2z6	0,02855

* Наявність цих регресорів в рівнянні регресії викликає сумнів

Число обумовленості COND = 2.59573

Таблиця К.5 - Залишки (по матриці)

№ з/п	Відгук за експериментом	Відгук за моделлю	Залишок	Відсоток відхилення
1	115	114,138	0,861848	0,749433
2	90	90,2336	-0,233555	-0,259505
3	120	122,976	-2,97567	-2,47973
4	95	95,7248	-0,724773	-0,762919
5	100	100,322	-0,321773	-0,321773
6	80	78,9641	1,03593	1,29491
7	110	109,265	0,734932	0,66812
8	80	78,9529	1,04706	1,30882
9	115	111,025	3,97512	3,45663
10	70	73,4585	-3,45854	-4,94077
11	90	90,6043	-0,604303	-0,671448
12	105	105,373	-0,373014	-0,355252
13	90	89,9814	0,0185669	0,0206299
14	120	120,467	-0,466784	-0,388987
15	60	59,8372	0,162808	0,271347
16	75	73,6779	1,32215	1,76287

Середня абсолютна похибка апроксимації – 1,1448;

Середня похибка апроксимації у відсотках – 1,23207.

Додаток Л

Практичні рекомендації з відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів. Типова технологічна інструкція процесу відновлення розподільного вала ЗТ комбінованим методом (на прикладі дизель-генератор 6ЧН 12/14)

Додаток Л.1. Практичні рекомендації з відновлення деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних електродугових покриттів.

Особливості електродугового методу нанесення покриттів. При електродуговому методі нанесення покриттів розпилення рідкого металу, що утворюється в результаті теплового впливу електричної дуги на торці двох дротяних електродів, проводиться струменем стисненого повітря або струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші (рис. Л.1). При цьому швидкість струменя на виході з сопла досягає 1500 м/с при температурі 2200⁰К. При розпиленні дротяних сталей струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші швидкісний напір потоку при ЕДН втричі більше, ніж при плазмовому напиленні. Це дозволяє частинкам розплавленого металу рухатися в потоці зі швидкістю понад 500 м/с і формувати покриття, що мають удвічі вищу міцність зчеплення з відновлюваною поверхнею, ніж при розпиленні дротяних сталей струменем стисненого повітря. Аналіз впливу початкових параметрів стану розпилювального газу на термодинамічні характеристики двофазного струменя і на ступінь диспергування матеріалу дротяних електродів показав, що параметрами, які впливають на величину аеродинамічної сили струменя, що діє на частинку розплавленого металу, є тиск P_0 і температура T_0 газу в розпилювальній головці електродугового апарату. При збільшенні початкового тиску розпилювального газу швидкість струменя на зрізу сопла і

її щільність зростають, що веде до збільшення швидкісного напору потоку. Відзначено, що при тиску понад 0,8 МПа зростання, як швидкості струменя, так і щільності газу в ній сповільнюється і при подальшому підвищенні тиску аж до 2,5 МПа щільність газу збільшується на 20%, а швидкість струменя лише на 9 – 14%, витрати ж розпилювального газу при цьому збільшується в 2,5 рази.

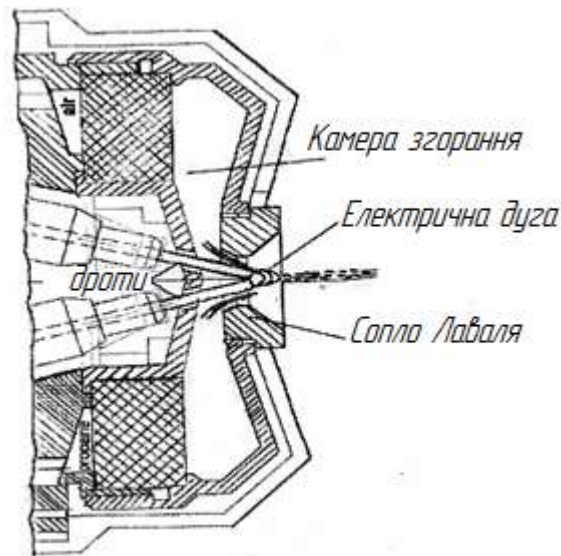


Рисунок Л.1 – Схема розпилювальної головки апарату для ЕДН

Підготовка відновлюваної поверхні. При ЕДН відновлюваній поверхні надають шорсткість або покривають такими матеріалами, як молібден, у якого при напиленні відбувається часткова молекулярна взаємодія з відновлюваною поверхнею. Спосіб додання шорсткості залежить від необхідної товщини покриття, напружень в ньому, конфігурації і габаритних розмірів деталі, а також подальшої обробки напиленого шару.

При підготовці поверхні потрібно враховувати наступне:

- а) спосіб підготовки повинен завжди створювати шорсткість, що забезпечує необхідне зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею;
- б) підготовлена поверхня повинна знаходитися при кімнатній температурі: якщо температура поверхні деталі нижче 0°C ; то перед підготовкою рекомендується її підігріти до кімнатної температури, так як

створення шару конденсаційної води значно знижує інтенсивність зчеплення покриття з відновлюємою поверхнею;

в) краї ділянки у підготовлюваної поверхні повинні заходити, щонайменше, на 20 мм за край ділянки, яка підлягає покриттю;

г) підготовку відновлюваної поверхні слід виробляти без застосування охолоджуючих засобів;

д) після підготовки відновлена поверхня не повинна стикатися з маслами, жирами, водою і т.д. Також не слід чіпати підготовлену поверхню руками. При перевертанні експериментального зразка (деталі) під час відновлення поверхні шляхом нанесення покриття або її обробки можна застосовувати тільки чистий знежирений інструмент (щипці) або рукавиці;

е) наносити покриття на відновлювану поверхню потрібно відразу після її підготовки, тобто готувати відновлювану поверхню можна тільки в тому випадку, якщо за цим слідує нанесення покриттів ЕДН. Це особливо стосується поверхонь, які готують і відновлюють електродуговими покриттями на відкритому повітрі;

ж) якщо безпосередньо відновлення ЕДН підготовленої по-поверхні неможливо або вона забруднилася, зволожити, її слід ще раз обробити абразивними засобами;

з) якщо підготовлену деталь необхідно транспортувати, її потрібно упакувати в папір, щоб уникнути забруднення.

Очищення деталей від забруднень (знежирення). Поверхні напилення деталей машин, як правило, забруднені залишками мастила або охолоджуючої рідини, залишками стружки від попередньої механічної обробки, продуктами зношування, фарбами тощо Тому перед механічною або струнко-абразивної обробкою, необхідно ретельно видалити забруднення.

Для непористих деталей очищення ділянок, що підлягають покриттю,

може здійснюватися за допомогою щіток або дрантя, змочених уайт спиритом, бензином, ацетоном і іншим органічним розчинниками. Крім поверхонь, на які наносяться покриття, очищаються і прилеглі ділянки. В іншому випадку, під дією тепла, що виділяється в процесі напилення, масло з цих ділянок може надходити на покривається поверхня.

Загальна знежирення непористих деталей здійснюється парами гарячого розчинника, промиванням органічними розчинниками, миючими засобами, лужними розчинами і емульсіями. Після знежирення водними розчинами або емульсіями проводять промивання водою.

Сушку деталей після промивання проводять в сушильних шафах при температурі 60 ... 150 ° С або обдуванням стисненим повітрям, очищеним від масла і вологи.

Особливу увагу слід приділяти повного видалення забруднень з прихованих порожнин (шпонкових і масляних канавок тощо). Видалення мастила з мастильних каналів здійснюється шляхом заливання в них розчинника і продувкою стисненим повітрям. Цю операцію слід повторювати кілька разів.

При промиванні деталей розчинник повинен бути чистим і використовуватися в достатній кількості. Пористі деталі і чавунні виливки вбирають рідку мастило в процесі експлуатації. В ході нагрівання деталі при напиленні масло виступає на поверхню і порушує зчеплення покриття з основою. Для таких деталей єдиним способом видалення мастила з пор є відпал при температурі 300 ... 350 ° С в муфельних або шахтних печах. Невеликі деталі можна літати за допомогою газового пальника. Нагрівання і витримка при температурі відпалу повинні здійснюватися до повного вигорання масла з пор.

Чистий поверхню є однією з головних передумов отримання якісного покриття. Тому, якщо в процесі напилення на покритті з'явилися масляні плями, то необхідно перервати процес, зняти отримане покриття і провести повторну очистку і напилення.

Попередня механічна обробка. Попередня механічна обробка поверхонь, що підлягають відновленню, здійснюється з метою забезпечення необхідної товщини наноситься металу, а також для усунення дефектів, що утворилися в результаті експлуатації, і додання зношеним ділянок правильної геометричної форми. Найменша глибина попередньої механічної обробки повинна бути достатньою, щоб забезпечити отримання мінімально необхідної товщини покриття і допуск на знос. У тих випадках, коли поверхня зношена нерівномірно, проводиться ступінчаста обточування.

При нанесенні покриття на поверхні, призначені для нерухомих посадок, мінімальна глибина попередньої обточування вибирається по таблиці Л.1 без додавання припуску на знос.

Таблиця Л.1 – Мінімальна товщина покриттів на деталях різних діаметрів

Діаметр деталі, мм	Мінімальна товщина покриття, мм (на сторону)
≤ 25	0,25
вище 25 до 50	0,40
вище 50 до 75	0,50
вище 75 до 100	0,65
вище 100 до 125	0,75
вище 125 до 150	0,90
св. 150	1,00

У кожному конкретному випадку необхідно враховувати зниження запасу міцності деталі при зменшенні поперечного перерізу. Там, де це можливо, ширина попередньо оброблюваної ділянки поверхні повинна бути на 15 - 20 мм більше ширини робочого ділянки поверхні. Краї обточеної ділянки повинні виконуватися зі скосами. У всіх випадках на обточувати ділянці слід уникати гострих кутів у крайок. Вони повинні бути закруглені або мати фаски.

Раковини, тріщини та інші поверхневі дефекти повинні бути обробити у вигляді «хвоста» або клина. Раковина прорубується зубилом, а її поверхня очищається і готується до напиленню струменево-абразивної обробкою. Слід

розширити раковину так, щоб наноситься матеріал заповнив її без утворення пустоти. Тріщини повинні бути зверху розширені зубилом, а їх краях, надають форму «хвоста». Доцільно просвердлити по краях тріщини невеликі отвори з тим, щоб заповнив їх метал запобігав подальше поширення тріщини.

Плоскі поверхні вимагають спеціальної обробки кромки або додаткової фіксації напиляного шару. Ці заходи є обов'язковими при напиленні покриттів товщиною більше 1 мм. Пази на ребрах плоских поверхонь можуть бути виконані пилкою з шириною полотна не менше 1,5 мм. Після виконання замикаючих елементів поверхні повинні бути підготовлені струменево-абразивної обробкою.

Підготовка поверхні під напилення. При напиленні не відбувається сплаву частинок напилюваного матеріалу з основним металом. Тому відновлюваних поверхні необхідно надати шорсткість для забезпечення механічного зчеплення напилюються частинок з мікронерівностями підкладки.

Метод підготовки поверхні залежить від товщини покриття, властивостей напилюваного матеріалу, матеріалу виробу, конфігурації і розмірів поверхні, способу подальшої обробки покриття.

Найбільш широко на практиці застосовують такі методи підготовки поверхні під напилення:

1. Нарізка «рваною різьблення»;
2. Обробка методом поверхневого пластичного деформування;
3. Нарізка канавок або «рваною різьблення»;
4. Струменево-абразивна обробка;
5. Електроіскрове легування;
6. Інші методи підготовки поверхні.

Підвищеною схильністю до розтріскування і відшарування мають покриття, напилені на внутрішні, плоскі, опуклі або увігнуті поверхні, що мають розриви (наприклад, поверхні валів зі шпонковими канавками) або інші концентратори напружень.

Для зниження впливу сил, викликаних усадкою напиленого шару, і прагнуть відокремити покриття від основи, рекомендується на напилюваній поверхні створювати рельєф, який копіюється шарами, напиленням на початковому етапі формування покриттів. В результаті площину можливого зсуву між покриттям і основою розбивається на безліч окремих ділянок, в кожному з яких сили мають своє певне спрямування.

Захист ділянок поверхонь, що не підлягають покриттю. Для запобігання налипанню напилюваного металу на дільниці деталей, що не підлягають зміцнення або близько прилеглі до місця напилення, їх покривають тонким шаром захисної пасти. Склад захисної пасти (мас.%) Наступний: графіт - 10, крейда - 20, мило - 70.

Зазначена суміш розбавляється водою в співвідношенні 3:1 і наноситься на поверхню. Після висихання пасти виробляють напилення покриття. Зазначена паста легко видаляється металевою щіткою після напилення.

При підготовці поверхні деталі методом нарізання «рваною різьблення» або канавок пасту рекомендується наносити до операції підготовки.

Ділянки, які не підлягають покриттю, можна також захищати за допомогою екранів і накладок з металу, азбесту і ін. Негорючих матеріалів.

Особливу увагу слід приділяти підготовці шпонкових канавок. Напруження, що виникають в напилювання покриттів, прагнуть відірвати покриття від крайок шпоночної канавки. Тому вздовж шпонкових канавок необхідно виконати закріплюють пази, як показано на малюнку 21. Крім того, необхідно захистити саму шпонкову канавку від попадання в неї напилюваного матеріалу, щоб виключити її подальшу обробку. Вали, що мають шпонкові канавки, попередньо обточуються на необхідну глибину. Після цього поверхню готується одним з вищеописаних методів. Краї шпоночної канавки повинні бути притуплені і з них вилучені задирки. Після цього в шпонкову канавку вставляють модельну шпонку, виготовлену з міді

або графіту і точно підігнані по розмірах. Її межі поліруються для запобігання прилипання напилюваного матеріалу. Грані модельної шпонки, що виступають над поверхнею вала, повинні бути скошені під кутом $3 - 5^\circ$. Грані мідної шпонки можуть бути скошені шляхом розплескування країв молотком. Шпонка повинна виступати на $l > 5$ мм над зовнішнім діаметром напиленої деталі, що пройшла остаточну механічну обробку (наприклад, якщо товщина покриття після обробки складає 1,7 мм на сторону, то шпонка виступає над підготовленою поверхнею на висоту $h = (1,7 + 1,5) = 3,2$ мм). Не слід застосовувати для виготовлення модельної шпонки деревину, тому що при напиленні вона буде горіти, що може привести до виходу з ладу в покритті.

Отвори для змащення, після повного видалення з них масла, баньки і закривають конусної або графітової пробкою з урахуванням методики, описаної для захисту шпонкових канавок. У тих випадках, коли мастильні отвори є досить великими, що захист може бути необов'язковою. В цьому випадку напилений метал незначно перекриє отвір.

При наявності на напилюємій поверхні мастильних канавок, їх поглиблюють (притуплюючи кромки). Неглибокі пази видаляють при попередній обробці, а після напилення заново нарізають на покритті. Глибина пазів при цьому не повинна перевищувати половини товщини напиляного шару.

Попередній нагрів відновлюємої деталі. Попередній нагрів необхідний для видалення водяного конденсату з поверхні деталі і запобігання розтріскування або відшаровування покриття.

Так як в атмосфері завжди присутні пари води, то вони утворюють на поверхні деталі невидиму водяну плівку. Крім того, в ході реакції вуглеводнів з киснем виділяються молекули води, що утворюють водяну пару, який конденсується на поверхні холодної деталі. Коли на зволожену поверхню потрапляють напилені частки, вода миттєво випаровується, створюючи парову сорочку, що перешкоджає міцному зчепленню частинок з

основою. Нагрівання поверхні деталі перед напиленням до температури 100 - 120 ° С є достатнім для повного видалення конденсату.

Як джерело нагріву може бути використана струмінь продуктів згорання робочих газів в камері згорання гіперзвукового металізатора без подачі напилюваного матеріалу.

Розтріскування або відшаровування покриття обумовлено різними за характером об'ємними змінами в деталі і шарі, оскільки в процесі напилення деталь розширюється, а покриття дає усадку. У тому випадку, коли нагрів деталі допустимо, його виробляють до температури, яка буде досягнута деталлю в процесі напилення. Ця температура буде залежати від матеріалу, розмірів деталі і тривалості напилення.

У будь-якому випадку температура попереднього нагрівання повинна бути нижче температури, при якій на поверхні утворюється видима оком окісна плівка, і знаходиться в межах 90 - 150 ° С.

Попередній нагрів деталі може використовуватися спільно з охолодженням, яке необхідно проводити, якщо температура деталі в процесі напилення буде перевищувати 250°С. Охолодження деталі здійснюється обдуванням стисненим повітрям (або аргоном, вуглекислим газом і ін.) В процесі напилення або тимчасовим припиненням напилення. У разі вимушеної перерви процесу напилення, перед його відновленням деталь необхідно підігріти.

Контроль температури можна здійснювати за допомогою термоіндикаторів олівців або за допомогою спеціальних швидкодіючих пірометрів (ТЩ-1-02 та ін.).

Напилення металевого підшару. Молібден. Напилення молібдену на чисту поверхню основного металу - маловуглецевої і неіржавіючої сталі, чавунного і сталевого литва, магнію і багатьох алюмінієвих сплавів створює хорошу підготовку для подальшої металізації. Напилений молібден міцно з'єднується з основним металом, і його шорстка поверхня забезпечує зчеплення з наступним шаром. Висока температура плавлення (2600°С)

дозволяє його часткам потрапляти на відновлювану поверхню з температурою понад 2500 °С. Завдяки великому запасу тепла відбувається точкова приварка на окремих невеликих ділянках частинок молібдену до основного металу.

При застосуванні молібдену в якості підшару слід дотримуватися наступне:

а) можна застосовувати звичайний електродугової Металізатор, але слід пам'ятати, що молібден сильно окислюється на повітрі. Тому для збільшення коефіцієнта використання необхідно вести напилення на укороченою дистанції (60 - 90 мм).

б) обробляється повинна бути ретельно очищена від оксидів і забруднень. Для підвищення міцності зчеплення добре обдути поверхню абразивом. При цьому приварення частинок молібдену полегшують невеликі нерівності, наявні на поверхні, які нагріваються швидше.

в) грубозернисте покриття з молібдену володіє кращим зчепленням, ніж дрібнозернистий. Для отримання крупнозернистого покриття необхідно проводити напилення на зниженому тиску розпилювального повітря.

г) шар конденсаційної води погіршує зчеплення, тому рекомендується попередній підігрів поверхні до 100 – 200 °С, коли це можливо.

д) частки молібдену повинні по можливості суцільно покривати відновлювану поверхню деталі.

е) якщо напилюється дуже товсті покриття (понад 1 мм), то перед напиленням молібдену необхідно нанесення рваною різьблення.

Нікель (ніхром). Нікелеві або ніхромові підшари, нанесені електродуговим апаратом, дають той же ефект, що і молібденові, тобто відбувається приварювання невеликих ділянок до основного металу. Ніхром наносять на звичайних режимах із середнім ступенем розпилу.

Слід, однак, відзначити, що ніхром і особливо молібден є дорогими і дефіцитними матеріалами. Тому вони знаходять застосування при нанесенні підшару лише в крайніх випадках.

Режими процесу напилення. Для виконання процесу гіперзвукової металізації існують встановлені режими; тільки виконуючи їх, можна отримати рівномірне і якісне покриття. Вирішальним для якісного напилення, звичайно, є хороший стан апаратури і допоміжних пристосувань. Це потрібно перевірити до початку напилення. Далі потрібно перевірити, чи достатній запас дроту, чи є пропан і стисле повітря, так як інакше довелось б переривати процес, що допускається тільки у виняткових випадках.

Поряд з робочими параметрами застосовуваної апаратури на процес металізації впливає насамперед відстань між соплом апарату і поверхнею виробу, продуктивність апарату, ступінь розпилу дроту, кут розпилу, тривалість перерв між напиленням окремих шарів, температура виробу і покриття, швидкість переміщення апарата.

Відстань від зрізу сопла до відновлюваної поверхні. Зазвичай відстань від сопла до відновлюваної поверхні становить 50 - 350 мм. Якщо вона дорівнює 50 - 80 мм, то таке напилення називають гарячим. З цієї відстані напилюють, коли габарити деталі забезпечують достатній тепловідвід і не створюють перегріву, який може викликати її викривлення. Перевага ЕДН при невеликій відстані полягає в тому, що знижуються втрати розпорошується металу, частинки потрапляють на поверхню в більш гарячому стані. Спосіб гарячого ЕДН не рекомендується застосовувати для напилення чутливих до деформацій і напружень деталей.

Нормальним вважають відстань 80 - 200 мм, причому нижній його межа рекомендується для відновлення деталей, які не чутливі до виникнення деформацій і напружень, а також для апаратів з невеликою продуктивністю. Так як при невеликій відстані міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею підвищується, то рекомендується починати нанесення покриття при невеликій відстані, а потім вести процес при великій відстані.

Час між напиленням окремих ділянок відновлюваної деталі. Відрізок часу між напиленням окремих шарів повинен бути якомога менше,

щоб уникнути утворення окислів і осідання пилу, які перешкоджають зчепленню частинок між собою.

Переміщення установки для ЕДН. Швидкість переміщення вибирається таким чином, щоб за один прохід наносився шар товщиною до 0,2 - 0,3 мм. Занадто повільне переміщення апарата викликає нагрів покриття з відповідним погіршенням його якості. Отже, більш товсті покриття потрібно напилювати з підвищеною швидкістю.

Рівномірність напилення залежить перш за все від переміщення апарата. Апарат переміщують до кінця напилюваного шару. При цьому половина ширини струменя розпоршених частинок повинна виходити за межі напилюємої області.

На краях покриття потрібно трохи сповільнити рух апарату, щоб отримати належну товщину шару. Додаткове напилення краю покриття, після закінчення нанесення покриття, не рекомендується через можливу появу усадочних напруг (небезпеки утворення тріщин і відшарування).

Переміщення апарату при напиленні плоских поверхонь раціонально проводити за певною схемою. Спочатку напилюють смугу за смугою, наполовину перекриваючи вже покриті місця. Потім починають другий прохід в протилежному напрямку. Зазвичай застосовують також спосіб нанесення смуг спочатку уздовж, а потім поперек квадрата.

Температура відновлюваної поверхні і покриття. Великою перевагою металізації є можливість наносити покриття на холодний основний метал. Попередній підігрів до 200⁰С доцільний іноді при напиленні молібденового або ніхромового підшарів. Температура напилюваного покриття не повинна перевищувати 200 ° С, щоб не викликати появи великої напруги (через небезпеку появи тріщин).

Обробка покриттів. Обробка покриттів, нанесених ЕДН, через незвичайну структури вимагає особливої ретельності, тобто суворого дотримання вказівок інструкції. Ці покриття обробляють подібно твердому лиття (а не прокатному металу). Покриття можна піддавати практично всім

видам механічної обробки: свердління, точіння, фрезерування, струганню. Одним з основних умов успішної механічної обробки покриттів є те, щоб зусилля, що виникають при різанні, не були спрямовані на відрив шару від основи, шар завжди повинен притискатися до основи.

Механічна обробка напилених покриттів. Структурні особливості і складний фазовий склад покриттів обумовлюють вибір методів і режимів їх механічної обробки, відмінних від що застосовуються при виготовленні деталей з однорідного металу.

Знання властивостей напилених покриттів дозволяє виконувати їх механічну обробку з мінімально можливими затратами. Токар або шліфувальник, не знайомі з характеристиками напиляного металу, будуть використовувати той інструмент, який застосовується для обробки однорідного металу аналогічної марки з рівною твердістю. В результаті не вдається отримати необхідну чистоту поверхні.

На властивості покриттів в значній мірі впливають навіть не-великі зміни режимів напилення, наявність забруднень в робочих газах і т.п., тому режими механічної обробки повинні коректуватися в кожному конкретному випадку.

Спосіб обробки напилених покриттів залежить від їх твердості. Покриття з твердістю 35 - 40 HRC можна обробляти на металорізальних верстатах твердосплавним інструментом.

Покриття з твердістю до 40 HRC обробляються різцями з пластинками твердих сплавів на наступних режимах: подача $S = 0,05 - 0,25$ мм/об; глибина $t = 0,1 - 0,4$ мм; швидкість різання $V = 20 - 30$ м/хв.

Оптимальними геометричними параметрами різців є: передній кут $\gamma = 0$ - ($- 5^\circ$); задній кут $\alpha = 6 - 8^\circ$; кут в плані $\phi = 30 - 90^\circ$; радіус при вершині $r = 0,1 - 0,2$ мм. Обробка покриттів з твердістю > 40 HRC або чистова обробка покриттів з твердістю 35 - 40 HRC здійснюється інструментом з гексаніта-Р.

Таблиця Л.3 – Режими обробки наведені в таблиці Л.3.

Режим обробки	Швидкість різання, м/хв	Подача, S мм/об	Глибина різання, t мм
Черна обробка	40 - 60	0,06 - 0,1	0,1 - 0,3
Чистова обробка	40 - 60	0,06 - 0,08	0,06 - 0,1

Обробка покриттів з бронзи здійснюється різцями зі швидкорізальної сталі на наступних режимах: швидкість різання $V = 30$ м/хв, $S = 0,08 - 0,12$ мм/об. Щоб поліпшити чистоту обробленої поверхні, необхідно обробляти ці матеріали із застосуванням емульсолу.

При використанні різців з пластинами з твердих сплавів режими обробки можуть бути більш жорсткими:

- попередня обробка: $V = 75 - 90$ м/хв при подачі $S = 0,15$ мм/об;
- чистове обробка: $V = 90 - 105$ м/хв при подачі $S = 0,08$ мм/об.

Використання твердосплавного інструменту дає кращу чистоту обробленої поверхні. Механічну обробку покриттів слід починати з обточування потовщень, що утворюються в місцях переходу від підготовленої поверхні до непідготовленою, на буртик і в кутах, використовуючи для цього різці із закругленою ріжучою крайкою.

Загальноприйнятим правилом, особливо при чистовій обточуванні покриттів, є установка різця трохи вище центру деталі, що дозволяє звести до мінімуму задній кут різця. Величина зміщення різця вище центру деталі підбирається експериментально до отримання задовільної якості обробки.

У всіх випадках при токарній обробці різець повинен рухатися від покриття на необроблена ділянка, щоб уникнути підривання покриття. Фаски на покритті також виконуються при русі різця з боку покриття.

Шліфування напилених покриттів здійснюється карборундовим або алмазним інструментом. Режими круглого шліфування:

- швидкість кола - 30 - 35 м/с;
- швидкість деталі - 30 - 32 м/хв;
- поздовжня подача - 1,2 - 1,5 м/хв;

- поперечна подача - 0,016 - 0,006 мм / дв. хід. (0,016 - при попередньому шліфуванні; 0,006 - при чистовому).

Режими плоского шліфування:

- швидкість кола - 30 - 35 м / с;
- поздовжня подача - 18 м/хв;
- поперечна подача - 1,8 мм/хід;
- глибина шліфування - 0,01 мм.

Шліфування виконується при рясному охолодженні.

Попереднє шліфування алмазним інструментом здійснюється колами на металевих зв'язках з алмазами зернистістю 250/200, 200/160, які забезпечують отримання шорсткості в межах 0,32.

Режим круглого шліфування:

- швидкість кола - 35 - 50 м/с;
- швидкість деталі - 25 - 35 м/хв;
- поздовжня подача - 1 м/хв;
- поперечна подача - 0,08 - 0,15 мм так. хід. (0,01 - 0,03 мм при останніх проходах).

Для фінішної обробки використовують алмазні чашкові круги на органічній зв'язці з алмазами зернистістю 40/28, 28/20.

Алмазне шліфування, необхідно виробляти при рясному охолодженні.

Напилені покриття під час свердління, стругання, фрезерування і обробці напилком можна піддавати вигинаючим і розтягуючим навантаженням і навантажень, які прагнуть відірвати покриття від основи.

Якщо в деталі з покриттям потрібно просвердлити отвір, то воно по можливості повинно починатися в основному металі. Для цього отвір в покритті необхідно розенкувати під кутом 45 °.

Додаток Л 2. Типова технологічна інструкція процесу відновлення розподільного вала ЗТ комбінованим методом нанесення ЗЗП (на прикладі дизель-генератор бЧН 12/14)

Вступ. Технологічна інструкція визначає основну технологічну операцію по відновленню шийок розподільного вала ЗТ. Наведений нижче процес є типовим для відновлення зношеної поверхні будь-якої деталі ЗТ, яка працює в парі з підшипниками ковзання і сальниковими ущільненнями (вали різного призначення, штоки, плунжери, піввісь, і тому подібні). Допустима довжина і маса деталі ЗТ, яка підлягає відновленню, визначаються можливістю технологічного обладнання, яке є в наявності на експериментально-виробничій ділянці (шліфувальний верстат, установка для ЕІЛ, апарат для напилення, обладнання для ПА). Дана інструкція встановлює вимоги до матеріалів, обладнання, вказує порядок підготовки, проведення та режимів технологічної операції і контролю якості отриманих відновлених деталей із покриттями.

Л.1 Матеріали і обладнання

Л.1.1 Для відновлення зношеної поверхні шийок розподільних валів в якості електродного матеріалу використовується дріт 40Х13 з діаметром 2 мм.

Л.1.2 Кожна партія дроту повинна супроводжуватися сертифікатом

Л.1.3 Перед використанням дріт необхідно просушувати.

Л.1.4 Дріт повинна зберігатися і транспортуватися в умовах, які запобігають порушенню цілісності упаковки і захищають її від корозії і механічних пошкоджень.

Л.1.5 Для виконання роботи по електроіскровий обробці зношеної поверхні розподільних валів і нанесення покриттів електродуговим напиленням і його обробки ПА використовується комплект спеціального обладнання. До складу комплекту технологічного обладнання входять:

- установка для електроіскровий обробки "Елітрон-22";
- установка для електродугового напилення ЕДН-10;
- джерело живлення ВДУ-506;
- двокамерна установка для ІА в імпульсному режимі.

Л.1.6 Установка для електроіскровий обробки "Елітрон-22" призначена для попереднього очищення шийок розподільних валів і формування необхідної шорсткості відновлюваної поверхні.

Л.1.7 Установка для електродугового напилення призначена для нанесення електродугових покриттів на попередньо підготовлені шийки розподільних валів.

Л.1.8 Для харчування електродугового апарату постійним струмом використовують випрямляч зварювальний типу ВДУ-506. Замість випрямляча ВДУ-506 може бути використано аналогічне джерело живлення з жорсткою вольт-амперною характеристикою.

Л.1.9 Для очищення стисненого повітря від твердих частинок, води і мінерального масла можна застосовувати фільтр-осушувач з продуктивністю 120 – 180 м³ / год.

Л.1.10 Фінішна обробка ЕДН – покриттів ІА (інструкція додається)

Л.2 Підготовчі роботи

Л.2.1 Дріт перед використанням потрібно просушити. Режим просушування: нагрів до 150 °С зі швидкістю 50 – 100 °С/год., витримка 2 години, охолодження – на повітрі. При дотриманні режиму прожарювання (сушіння) поверхню дроту набуває солом'яний колір.

Л.2.1.1 Бухту дроту масою 3 – 5 кг укласти в касети (при їх наявності) або в пристрій, що їх замінює. Завести кінці дроту в апарату для напилення.

Л.2.2 Встановити відновлюваний розподільний вал на приймальний стіл для очищення.

Л.2.2.1 Очистити відновлювану деталь від бруду за допомогою шабера і металевої щітки.

Л.2.2.2 Протерти відновлювану деталь обтиральними кінцями, змоченими в миючому розчині для очищення від масла.

Л.2.3 Визначити величину зносу відновлюваної поверхні (виміряти діаметр деталі в зоні, яка підлягає покриттю) штангенциркулем.

Л.2.4 Провести контроль відновлюваної деталі зовнішнім оглядом за допомогою лінзи. Тріщини і раковини не допускаються.

Л.2.5 На спеціальному круглошліфувальні верстаті провести попереднє шліфування шийки, яка підлягає реставрації, згідно з документацією на даний розподільний вал. Заниження зазначеного розміру становить 0,3 – 0,5 мм на діаметр.

Л.2.6 Після попереднього шліфування розподільного вала, необхідно провести поверхневий огляд пошліфувати шийки за допомогою лупи. При наявності тріщин вал відбраковують.

Л.3 Технічна частина

Л.3.1 Процес відновлення розподільних валів включає такі операції:

- електроіскрову обробку шийки;
- контроль поверхні шийки після ЕІО;
- напилення шийки;
- контроль відновлених шийок;
- зачистка (зенківка) отворів розподільчих валів;
- остаточне шліфування шийки;
- контроль відновленої шийки розподільного вала;
- обробка напилених шийок ПА;
- консервування розподільного вала для зберігання.

Л.3.1.1 Перед ЕІЛ і ЕДН розподільного вала необхідно заглушити отвори олійних каналів. Для цього використовують дерев'яну або гумову заглушку конічної форми, яку забивають в отвір так, щоб краю заглушки виступали, над поверхнею шийки на 1,0 – 1,5 мм.

Л.3.1.2 Підготовлений для ЕІЛ розподільний вал перемістити на

робочий стіл.

Л.3.1.3 Включити установку для ЕІЛ. Режим ЕІЛ: тиск стисненого повітря, МПа 0,5 – 0,6 відстань між соплом і відновлюваної поверхнею, 80 – 120 мм

Л.3.1.4 Провести контроль підготовленої під напилення поверхні (Зовнішнім оглядом).

Л.3.1.5 Сліди масла, волога і бруду не допускаються. Поверхні повинна бути світло – сірого кольору без пропусків на обробки.

Л.3.1.6 Після ЕІЛ, підготовлений до напиленню розподільний вал перемістити до електродугової установці і закріпити в обертальному приладі (в патроні токарного верстата).

Л.3.1.7 Поверхні розподільного валу, на які не буде наноситися покриття, покрити захисною мильно – графітовою пастою. Пасту нанести пензлем.

Л.3.1.8 Підвести електродугової апарат до шийки, яка підлягає відновленню і виставити його.

3.1.9 Основні параметри робочого режиму апарату для ЕДН:
 напруга, В27 – 32;
 відстань від сопла ЕДН – апарату до відновлюваної поверхні, мм ...160 – 180
 швидкість поздовжнього переміщення ЕДН – апарата, мм/хв..... 200
 частота обертання валу, хв⁻¹60
 тиск стисненого повітря, МПа0,27 – 0,37
 тиск пропану, МПа 0,3 – 0,4

Л.3.1.10 Порядок нанесення покриття електродуговим напиленням:
 – включити обертач з закріпленим розподільним валом;
 – включити апарат для напилення згідно його технічного паспорту;
 – напилити послідовно поверхню шийок розподільного валу. Товщина напиляного шару за один прохід повинна становити 0,1 – 0,25 мм. При більшій товщині напиляного шару можливі перегріву і відшаровування.

Л.3.1.11 Після напилення трьох шарів покриття провести контроль

товщини шару вимірами в трьох перетинах, виконавши по три вимірювання діаметрів в кожному перетині.

Л.3.1.12 Нанести покриття на всю шийку. Загальна товщина напиляного шару вибирається та в залежності від величини зносу відновлюваної поверхні шийки, але не менше 0,5 мм і не більше 2,0 мм на сторону.

Л.3.1.13 Припуск напиляного шару на механічну обробку становить від 0,5 до 2 мм на сторону, в залежності від товщини покриття.

Л.3.1.14 Вимкнути обертач з закріпленим розподільним валом.

Л.3.1.15 Провести контроль напилених поверхонь зовнішнім оглядом із застосуванням лінзи. Перевірити діаметр відновленої поверхні шийки штангенциркулем на відповідність оптимальному розміру. Тріщини, відшарування - не допускаються. Покриття на відновленій поверхні повинно мати світло-сірий колір без смуги мінливості і яскраво виражених плям.

Л.3.1.16 Зняти розподільний вал з обертала і передати його для заключного шліфування на спеціальному шліфувальній верстаті.

Л.3.1.17 Перед шліфуванням вибити дерев'яну (гумову) заглушку, а отвори, для попередження сколювання покриття, зенкувати, використовуючи твердосплавну зенківку. Під час зенкерування стежити, щоб не було сколювання покриття по краях отвору.

Л.3.1.18 Отвори продути стисненим повітрям.

Л.3.1.19 Шліфування проводити абразивним кругом з електрокорунду або карбиду кремнію середньої твердості.

Режими шліфування:

- глибина шліфування (чорнова), мм 0,1 – 0,5
- глибина шліфування (чистове), мм 0,01 – 0,03
- при шліфуванні застосовувати Емульсол (Амінол, МХО-101, ПВК).

Л.3.1.20 Відшліфувати всю шийку розподільного валу до номінального розміру, зазначеного в документації на розподільний вал. Шорсткість оброблюваної поверхні після шліфування повинна бути не більше Ra 0,63.

Л.3.1.21 Перевірити діаметри шийок за допомогою мікрометра на відповідність номінальним розмірам.

Л.3.1.22 Процес азотування включає наступні операції: завантаження камери, відкачка і нагрів, азотування, охолодження деталі в вакуумі або в середовищі захисного газу, вивантаження деталей з камери.

Для проведення азотування слід також враховувати вказівки з очищення деталей. На поверхні деталей не повинно бути органічних плівок (жирових, масляних). Так як газовиділення з неочищених пустот може чинити негативний вплив на стабільність тліючого розряду при нагріванні (і за певних умов призвести до збільшення тривалості нагрівання), очистку слід проводити дуже ретельно.

Пристосування з деталями завантажити в вакуумну установку. Перевірити на поверхні пристосування і деталей наявність ворсинок, слідів масла, вологи, заглушити отвори, які не підлягають азотуванню. При складанні садки (деталей на пристосуванні) необхідно, щоб вони прилягали один до одної щільно неазотуємими поверхнями, або зазор між деталями був не менше 20 мм. Зовнішню і внутрішню різьбу на деталі захистити механічним шляхом. Відкачати камеру установки до тиску 4 – 8 Па. Включити подачу аргону і довести тиск до 45 Па. Включити напругу приблизно 1 А – 300 В і провести попередню очистку деталей до зникнення мікродуг. Після зникнення мікродуг плавно довести високу напругу до 440 В і так 12 – 15 А і при температурі 300°C і тиску 60 – 65 Па, подати азот і довести тиск, плавно, до 86 Па.

Витрата аргону 2,1 – 2,15, азот додається до витрат 2,4 – 2,5. Пірометр встановити після закінчення очищення. Плавно довести напругу до 430 – 440 В, а силу струму до 14 – 17 А і тиску 86 – 88 Па при досягненні температури 520 – 540°C зробити витримку 10 – 16 годин (в залежності від необхідної глибини азотування). Орієнтовна швидкість азотування становить 0,1 мм за 3,2 години. Температура охолоджуючої води повинна бути 40 ± 10^0 .

Після закінчення часу витримки вимкнути подачу напруги, подачу газу,

провести відкачування вакууму в камері протягом 40 – 50 хв. і залишити остигати деталі в камері в уникненні повідці до температури не менше 100°C.

У камері для плазмового азотування деталі можуть знаходитися як в вертикальному, так і в підвішеному стані, причому вони автоматично, через завантажувальний оснащення з негативним полюсом (катодом) блоку живлення. При завантаженні деталей необхідно враховувати, що його поверхні, на які встановлюються і з якими контактують деталі, не повинні давати зони світіння, тобто після азотування ці поверхні повинні залишатися м'якими.

Після включення і відкачування камери до тиску, наприклад, 10 Па підтримується тліючий розряд. Попередньо на пульті управління повинні бути задані всі параметри процесу, такі як температура, тривалість, тип газу, тиск.

Процес обробки починається з очищення, при якій в результаті випаровування, обумовленого іонним бомбардуванням, з поверхні деталі видаляються завжди наявні на ній забруднюючі домішки. Потім садку нагрівають у вигляді тліючого розряду.

Щоб уникнути жолоблення деталей охолодження виробляється повільно в вакуумі. Підвищення продуктивності в залежності від циклу обробки може досягати 50 ÷ 70% без підвищення собівартості деталей.

Л.3.1.23 Развакумувати камеру установки, витягти з камери пристосування з деталями. Деталі упакувати, пристосування розібрати і скласти на стелажі.

Л.4 Технічний контроль

4.1. В процесі відновлювання деталі необхідно проводити операційний контроль якості підготовки деталі до ЕІЛ, після ЕІЛ, напилення, механічної обробки, ПА. Контроль якості ведуть в 100% обсязі.

4.2. Основні дефекти, виявлені зовнішнім оглядом, причини їх виникнення та способи запобігання наведені в табл. Л4.

Таблиця Л.4 – Основні дефекти, виявлені зовнішнім оглядом, причини їх виникнення та способи запобігання

Дефект	Причина виникнення	Спосіб попередження
Покриття пористе	Невірно встановлено тиск повітря і тиск пропану	Встановити тиск повітря і пропану згідно з інструкцією для забезпечення нормального витоку високошвидкісний струменя
Відшаровування покриття	Мінімальна відстань між соплом електродугового апарату і відновлюємою поверхнею. Неякісна підготовка поверхні. Низька частота обертання валу.	Встановити відстань між соплом електродугового апарату і поверхнею напилювання згідно з інструкцією. Повторити підготовку поверхні. Встановити необхідну частоту обертання валу.
Тріщини в покритті	Товщина покриття більш ніж допустима. Порушення параметри режиму напилення.	Товщина покриття не повинна перевищувати 2 мм. Відкоригувати параметри режиму напилення.
Перегрів, частковий перепал металу	Знижено відстань між соплом електродугового апарату і відновлюваної поверхнею. Мала швидкість переміщення електродугового апарату. Завищені електричні параметри режиму напилення.	Встановити відстань між соплом електродугового апарату відновлюваної поверхнею згідно з інструкцією. Встановити необхідну швидкість переміщення електродугового апарату. Откоректувати режими напилення.

Л.4.3 Контроль якості азотованих поверхонь. Контроль проводиться виконавцем і контролером. Контроль твердості поверхні проводиться на твердоміром Віккерса і твердоміром ТКС-1(супер-Роквеллом) за шкалою 15N і великогабаритних деталей на універсальному твердомірі NOVOTEST-T.

Л.5 Вимоги і техніка безпеки

Л.5.1 При проведенні роботи на ділянці відновлення розподільних валів комбінованим методом ЕІЛ + ЕДН + ПА існує ряд небезпечних факторів, а саме, можливість:

- ураження електричним струмом;
- ураження очей випромінюванням дуги;
- травмування стисненим повітрям і рухомою частиною обладнання.

Л.5.2 В процесі напилення необхідно захищати очі від випромінювання, яке виникає при горінні дуги, захисними окулярами.

Л.5.3 Для захисту органів слуху від шуму необхідно використовувати навушники.

Л.5.4 З метою захисту працівника, який виконує роботу на обладнанні, від ураження електричним струмом, необхідно використовувати діелектричний килимок.

Л.5.5 Забороняється виконувати роботу при тиску повітря напірної магістралі понад 0,7 МПа. Контроль тиску повітря здійснюється манометром.

Л.5.6 Видалення аерозолів, димових газів і пилу з робочої зони проводиться витяжною вентиляцією через витяжку типу «Циклон». Очищення збірника пилу проводиться в міру необхідності, але не рідше одного разу на місяць.

Л.5.7 Приміщення, в якому розміщено обладнання, повинно відповідати вимогам "Санітарних норм проектування промислових підприємств» та «Протипожежний вимогам підприємств і населених пунктів».

Л.5.8 Приміщення, в якому розміщено обладнання, повинно бути забезпечено засобами пожежогасіння. У разі виникнення пожежі, на робочому місці необхідно використовувати вогнегасники.

Л.5.9 Перед початком роботи необхідно ретельно оглянути обладнання. Робота на несправних обладнанні категорично заборонена.

Л.5.10 До роботи на установці для ПА допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, інструктаж з техніки безпеки на робочому місці, вивчили інструкції та пройшли перевірку знань правил експлуатації установки і мають посвідчення на право роботи на електроустановках з напругою 1000 В з кваліфікаційною групою з електробезпеки не нижче за третю.

Л.5.11 Експлуатація установки допускається тільки за наявності на зміні двох осіб, які мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче третьої.

Л.5.12 Ремонтні роботи в приміщенні при працюючій установці можуть

працівники, які мають другу кваліфікаційну групу з електробезпеки.

Для забезпечення безпеки робіт на установці передбачені: захисне заземлення вакуумних насосів, корпусу установки і високовольтного джерела; діелектричні рукавиці; огорожу обертових частин насоса; витяжна вентиляція; пиლოსос, респіратор.

Л.5.13 Під час процесу азотування, прогрівання деталей необхідно стежити за показаннями вольтметра і амперметра, тиску, витратоміра і температурою води, що охолоджує.

Л.5.14 Так як ідеально очистити деталі неможливо в процесі нагрівання відбувається остаточна чистка аргонном з утворенням незначного вмісту сажі, тому при розкритті камери, розвантаженню її та подальшої чищенні необхідно працювати в захисних окулярах ГОСТ 12.4.003-80 і респіраторі типу Пелюсток-40 марки ШБ-1 ГОСТ 12.4.028-76.

Л.5.15 Після роботи камеру залишати відкочений до тиску 1,333 Па.

Л.5.16 Включення установки категорично забороняється: при несправній системі блокування; при несправній системі електропостачання; при несправній системі водоохолодження.

Л.5.17 Робота на установці без засобів протипожежної безпеки забороняється.

Л.5.18 При використанні вантажопідійомних механізмів дотримуватися правил техніки безпеки під час їх експлуатації.

Л.6 Консервація і зберігання

Л.6.1 Відновлені поверхні деталі після заключної механічної обробки змастити консерваційні мастила.

Л.6.2 Законсервовану деталь зберігати в спеціально відведеному для цього закритому від атмосферних опадів місці.

Додаток М

Патент, який засвідчує право інтелектуальної власності



Додаток Н

Список публікацій за темою дисертації та відомості
про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. М.С. Агеєв, 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. Агеєв, 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. Агеєв, 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. Pohorletskyi, 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. Агеев М.С. 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. Агеев, 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. Агеев 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. Агеев, 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. Агеев 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. Агеев, С.Л. Чиграй Повышение ресурса судовых насосов на основе комбинированной технологии восстановления. Збірник наукових праць «Водний транспорт» Київ: КДАВТ, 2015. Вип. №2 (24). С. 57 – 70.

16. М.С. Агеев, 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. Агеев, 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. Агеев, 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. Агеев 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. Агеев 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 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 – і 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 теорій 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 Інженерія поверхні і реновація виробів: матеріали 17 – і 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 – ії 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. Ю.В. Волков, М.С. Агеев, Е.К. Соловых 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, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы 16 – ой международной научно – практической конференция. (20 – 23 сентября 2016, Одесса). Одесса: 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.

Відомості про апробацію 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, 17-18 вересня 2015 р., очна форма участі); «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для обслуговування» (Херсон, 24 - 25 вересня 2015 р, 22 - 23 вересня 2016 р, 28 -29 вересня 2017 р, 13 - 14 вересня 2018 р, 12 - 13 вересня 2019 р, 08 - 10 вересня 2020 р., очна форма участі); «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (Затока, Одеська обл., 15 - 18 вересня 2015 р.; 20-23 вересня 2016 р. заочна форма участі); «Increase of Machine and Equipment Reliability (Кропивницький, ЦНТУ, 15 - 17 квітня 2020 р., заочна форма участі); міжнародних науково-технічних конференціях «Інженерія поверхні і реновація виробів» (Затока, Одеська обл., 01 - 05 червня 2015 р.; Одеса, 29 травня - 02 червня 2017 р.; Свалява, Закарпатська обл., 4 - 8 червня 2018 р.; Київ, 1 - 5 червня 2020 р. заочна форма участі); «Інноваційні технології в машинобудуванні» (Новополоцьк, Білорусь, 21 - 22 квітня 2018 р., заочна форма участі); міжнародних науково-технічних семінарах «Сучасні проблеми підготовки виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті» (Свалява, Закарпатська обл., 22 - 26 лютого 2016 р. очна форма участі) та International Scientific and Technical Seminar «Modern questions of productions and repair in industry and in transport» (Brno, Czech Republic, February 10 - 16 2018; Tbilisi, Georgia, March 23 - 29, 2020).