

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.413.3.436

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.8

© Агєєв М.С.¹, Черненко В.В.²

РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ В ПРОЦЕСІ РЕМОНТУ НА БАЗІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Запропоновані основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту, яка відображає функціональні, експлуатаційні, матеріально-технічні та технологічні аспекти ремонту деталей засобів транспорту шляхом використання багатофункціональних покриттів, нанесених за допомогою інтегрованих технологій. Представлено реалізацію концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту, яка полягає в використанні багатофункціональних покриттів, визначенні раціональних режимів комбінованого методу нанесення покриттів та управління ресурсом деталей засобів транспорту на основі впливу факторів управляючої дії. Розроблені основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту 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. Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано положення системного підходу, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності 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. Для ефективного вирішення проблеми забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів була виявлена системна взаємодія факторів, що визначають хід процесу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, у вигляді схеми структурних взаємозв'язків та отримана морфологічна матриця формування процесу ремонту з урахуванням можливих варіантів відновлення деталей засобів транспорту.

Ключові слова: концепція ремонту, системна взаємодія, системний підхід, морфологічна матриця, багатофункціональні покриття, системні властивості, методологічний підхід.

M.S. Ahieiev, V.V. Chernenko. Development and implementation of the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of means of transport during the repair process based on a system analysis. The main principles of the formation of the concept of ensuring the reliability of the repairable parts of the means of transport during the repair process are proposed, which reflects the functional, operational, material-technical and technological aspects of the repair of the parts of the means of transport through the use of

¹ д-р техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-5691-8986, taxageev73-73@ukr.net

² ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

multifunctional coatings applied with the help of integrated technologies. The implementation of the concept of ensuring the reliability of renewable parts of means of transport is presented, which consists in the use of multifunctional coatings, the determination of rational modes of the combined method of applying coatings and resource management of parts of means of transport based on the influence of factors of control action. The main principles of the formation of the concept of ensuring the reliability of the repairable parts of the means of transport during the repair process are developed, the implementation of the concept based on the use of a system approach, analysis of materials, features of equipment structures, processing modes at the stages of the repair process, basic statistical and mathematical methods, experimental results are presented. As a scientific basis for the rational and effective achievement of the research goal, the work uses the provisions of the system approach, namely, a set of methodological principles and provisions that allow us to consider ensuring the reliability of means of transport and their elements as a single system with the coordination of the activities of all its subsystems. The basis is the study of each element of the system in its connection and interaction with other elements, observation of changes taking place in the system, identification of specific system properties, putting forward well-founded assumptions about the patterns of system development and determining rational modes of its functioning. In order to effectively solve the problem of ensuring the reliability of means of transport and their elements, the systemic interaction of factors that determine the course of the restoration process by the combined method of applying multifunctional coatings in the form of a scheme of structural interconnections and the obtained morphological matrix of the formation of the repair process, taking into account possible restoration options, were identified details of means of transport.

Key words: *concept of repair, system interaction, system approach, morphological matrix, multifunctional coatings, system properties, methodological approach.*

Постановка проблеми. Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано положення системного підходу, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту (ЗТ) 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.

Для ефективного аналізу механізму явищ та управління способом відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей конструктивних елементів (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 [1-3]. 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 [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним напрямком реалізації концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ в процесі ремонту та розробці методології синтезу комбінованих багатоопераційних технологій присвячена робота [5]. В роботі доведено, що у комбінації методів відновлення багатофункціональними покриттями переважає емпірично-інтуїтивний підхід. Автори зазначають, що явище інверсії, коли зміна послідовності операцій відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів, призводить до результатів, які відрізняються. Оптимальний вибір методів відновлення та їх послідовність визначається підвищенням твердості, комплексу механічних властивостей, зносостійкості, а також шорсткості відновлюваної поверхні і точності розмірів відновлюваної деталі.

Кожний метод відновлення має свою нішу оптимальних умов використання, включаючи навіть технологічні традиції, що склалися на конкретному підприємстві, тому реалізований системний підхід до відновлення деталей ЗТ є вирішальним фактором у виборі первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів у комбінованому процесі відновлення і можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл [6].

В роботах [7, 8] запропоновано комплексний методологічний підхід до рішення проблеми відновлення зношених поверхонь деталей ЗТ, який дозволяє логічно впорядкувати складні теоретичні та експериментальні дослідження на сумісній методичній інформаційній базі. Також в роботі наведена характеристика установок, матеріалів та методик, що використовуються для експериментальних досліджень.

Методологія науково-експериментальних досліджень призначена для скорочення об'єму експериментальних робіт, отримання максимальної інформації та пропонує використання комплексу експериментально-статистичних та обчислювальних методів досліджень. Ці методи дозволяють визначити оптимальні технологічні режими електродугового напилення (ЕДН), з допомогою яких можна отримати покриття з заданими властивостями та забезпечити оптимальне співвідношення характеристик міцності в композиції «поверхня – покриття», а саме максимальну міцність. Тобто технологію нанесення покриттів ЕДН слід розглядати як спосіб управління властивостями поверхневого шару. При цьому конструювання матеріалу типу «поверхня – покриття» базується не тільки на співвідношенні властивостей покриття з умовами експлуатації, але й на співвідношенні властивостей покриття з властивостями відновлюваної поверхні. В розглянутій роботі розроблена загальна методологія, яка базується на застосуванні системного підходу до рішення наукової проблеми і математичного моделювання процесу ЕДН, з метою вивчення особливостей процесу напилення, встановлення закономірностей впливу параметрів ЕДН на властивості та структуру отриманих покриттів, на вибір оптимальних режимів ЕДН та розробку технологічних процесів (ТП) нанесення ЕДН-покриттів [9].

Спираючись на проведений інформаційний огляд останніх досліджень і публікацій можна сказати, що розробка та реалізація концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту на базі системного підходу дозволить встановити структурні зв'язки між теоретичними та експериментальними дослідженнями та скоротити об'єм експериментальних робіт. Концептуально реалізований підхід до ремонтного виробництва дозволить забезпечити надійність ЗТ та їх елементів в процесі ремонту.

Метою дослідження є розробка концепції забезпечення надійності деталей ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів, сформувані основні принципи побудови концепції, реалізувати концепцію на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Виклад основного матеріалу. Концепція забезпечення надійності деталей ЗТ в процесі їх ремонту враховує структурні та морфологічні особливості відновлюваної поверхні після електроіскрового легування (ЕІЛ), вплив параметрів ЕДН на якість системи «відновлювана поверхня – покриття» та модифікуючу дію імпульсного іонного азотування (ІА) на напиленні покриття.

Основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних конструктивних елементів 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 ІА, 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 (ІС) та науково-технологічній (СТС).

– ІС (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 ІА (ESPIN));

– СТС (вибір способу підготовки відновлюваної поверхні (CSPM), вибір способу нанесення багатофункціонального покриття (CCM), вибір способу підвищення зносостійкості і мікротвердості (SMIRM), ЕІЛ (EA), ЕДН (EAS), ІА (PIN), вибір обладнання для ЕІЛ (SEEA), вибір обладнання для ЕДН (SEEAS), вибір обладнання для ІА (SEPIN), вибір режимів ЕІЛ (SMEA), вибір режимів для ЕДН (SMEAS), вибір режимів для ІА (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 KE деталей ЗТ в залежності від їх рівнів. Синтез отриманих функцій являє собою функціонал QRS (якісна відновлена поверхня), який характеризує якість відновлюваних поверхонь KE 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. 1).

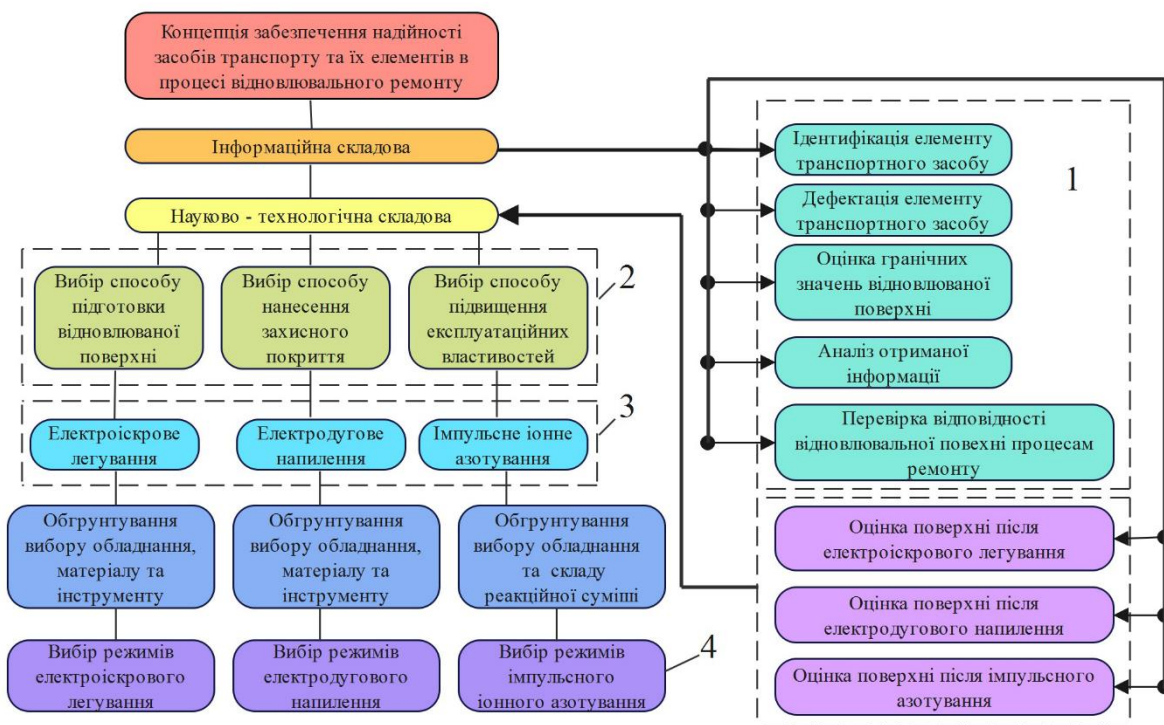


Рис. 1 – Структурна схема формування багатофункціональних покриттів в процесі ремонту деталей ЗТ

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: концептуальний рівень дослідження, що вміщує аналіз системного оточення, виділення з нього технологічних процесів відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, який включає електрохромне легування, електродугове напилення і

імпульсне іонне азотування, та обґрунтування його вибору, що створюють структурно-операційний базис концепцій проведення операції вибору;

3 рівень: 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;

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

Взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу ремонту, представлений у вигляді структурної схеми формування багатофункціональних покриттів на всіх етапах ремонту КЕ ЗТ (рис. 1).

Системність і комплексний методологічний підхід щодо визначення закономірностей впливу режимів комбінованого способу формування багатофункціональних покриттів, що включає ЕЛ, 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 представлені єдиною системою, що дало можливість оцінити взаємодію всіх її частин і об'єднати їх на необхідній методологічній основі (рис. 1).

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).

Наведений метод полягає в багатоваріантному дослідженні функціонального призначення ТЗ та його елементів з врахуванням умов експлуатації, класифікації деталей, вузлів та агрегатів за конструкторсько-технологічними ознаками, формуванні інтегрованої технології відновлення елементів ТЗ з використанням багатофункціональних покриттів, матеріально-технічної бази та функціонального аспекту ремонтного виробництва, детального аналізу етапів ремонтного процесу.

В морфологічній матриці формування ТП відновлювального ремонту для елемента А визначено чотири основні ознаки, від яких залежить механізм зношування, процеси руйнування поверхні деталей, зміна форми деталі: 1 – функціональне призначення засобів транспорту; 2 – призначення агрегату; 3 – призначення вузлів; 4 – призначення деталей. Для елемента В визначено теж чотири основні ознаки: 1 – навантаження; 2 – агресивне середовище; 3 – похибки складання і монтажу; 4 – експлуатаційні фактори. Елемент С має три основні ознаки: 1 – групи деталей; 2 – представники груп; 3 – відновлювані елементи. Елемент матриці D, який безпосередньо впливає на формування процесу ремонту має чотири ознаки: 1 – способи підготовки відновлюваної поверхні; 2 – способи нанесення покриття; 3 – хіміко-термічні способи; 4 – наплавлення. Для виробничо-технічної бази ремонту (елемент Е) існують наступні чотири основні ознаки: 1 – електроенергія, газ, вода; 2 – розподіл праці; 3 – вибір обладнання; 4 – матеріал для відновлення. Для елемента F виділені наступні три ознаки: 1 – розробка технічної документації; 2 – розробка конструкторської документації; 3 – підготовка виробництва.

A. Функціональне призначення деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту			
1. Функціональне призначення засобів транспорту		2. Призначення агрегату	
1.1. Вид транспорту		2.1. Перетворення руху	
1.1.1. Наземний		2.2. Передача крутного моменту	
1.1.2. Повітряний		2.3. Газорозподіл	
1.1.3. Залізничний		2.4. Перетворення енергії	
1.1.4. Спеціальний		2.5. Перетворення руху	
1.1.5. Водний		2.6. ГТД	
3. Призначення вузлів		4. Призначення деталей	
3.1. Передача енергії		4.1. Перетворення руху	
3.2. Керування		4.2. Передача руху	
3.3. Накопичення енергії		4.3. Керування	
3.4. Перетворення енергії		4.4. Опора	
3.5. Перетворення руху		4.5. Кріплення	
B. Врахування умов експлуатації деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту			
5. Навантаження		6. Агресивне середовище	
5.1. Ударні		6.1. Хімічне	
5.2. Розтягнення		6.2. Абразивне	
5.3. Стиснення		6.3. Високотемпературне	
5.4. Крутіння		6.4. Вологе	
5.5. Згин		6.5. Газоподібне	
5.6. Складне		6.6. Комбіноване	
7. Похибки складання і монтажу		8. Експлуатаційні фактори	
7.1. Порухи норм при отриманні заготовки		8.1. Призначення машин	
7.2. Порухи норм при складанні та монтажі		8.2. Швидкісний режим	
7.3. Порухи норм при регулюванні		8.3. Режим навантаження	
7.4. Порухи технології термічної обробки		8.4. Інтенсивність експлуатації	
7.5. Порухи норм при випробуванні		8.5. Своєчасність та повнота технічного обслуговування	
7.6. Комбіновані			
C. Класифікація деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту за конструктивно-технологічними ознаками			
9. Групи деталей		10. Представники груп	
9.1. Складної конфігурації		10.1. Корпусні	
9.2. Конічні		10.2. Зуб'я шестерень	
9.3. Циліндричні		10.3. Вали	
9.4. Плоскі		10.4. Диски, пази, канавки	
11. Відновлювані елементи			
11.1. Посадочні отвори			
11.2. Пази, канавки			
11.3. Зуб'я, шліці			
11.4. Поверхні			
D. Формування інтегрованої технології відновлення деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту			
12. Способи підготовки поверхні		13. Способи нанесення ЗЗП	
12.1. Обробка дробом		13.1. Газополум'яне	
12.2. Обробка піском		13.2. Детонаційне	
12.3. Нанесення насічок		13.3. Електродугове	
12.4. Нарізання різби		13.4. Плазмове	
12.5. Електроіскрове легування			
14. Хіміко-термічні способи		15. Наплавлення	
14.1. Гальванічні покриття		15.1. Вібродугове	
14.2. Цементация		15.2. Електродугове	
14.3. Борування		15.3. В середовищі вуглекислого газу	
14.4. Азотування		15.4. Під шаром флюсу	
E. Виробничо – технічна база ремонтного виробництва			
16. Електроенергія, газ, вода		17. Розподіл праці	
16.1. Витрати на підготовку поверхні		17.1. На підготовку обладнання	
16.2. Витрати на процес наплення		17.2. На процес підготовки поверхні	
16.3. Витрати на процес азотування		17.3. На процес наплення	
16.4. Загальні витрати		17.4. На процес азотування	
18. Вибір обладнання		19. Матеріал для відновлення	
18.1. Для ЕІЛ		19.1. Матеріали для ЕІЛ	
18.2. Для ЕДН		19.2. Матеріали для ЕДН	
18.3. Для ПА		19.3. Матеріали для ПА	
F. Функціональний аспект ремонтного виробництва			
20. Розробка технічної документації		21. Розробка конструкторської документації	
20.1. Технічна пропозиція		21.1. Функціональні вимоги	
20.2. Технічний проект		21.2. Експлуатаційні вимоги	
20.3. Ескізний проект		21.3. Нормативні вимоги	
20.4. Виготовлення технічної документації для опитного зразка		21.4. Всі вимоги	
22. Підготовка виробництва			
22.1. Проектування технологічних процесів			
22.2. Розміщення обладнання за технологічним процесом			
22.3. Вибір технологічного оснащення			
22.4. Вибір методів контролю виробництва			
J. Електроіскрове легування			
23. Інструмент		24. Тип контакту інструменту	
23.1. Вібратійні збудники		24.1. Детермінантний	
23.2. Багатоелектродні головки		24.2. Статичний	
23.3. Електромагнітний збудник		24.3. Змішаний	
23.4. Пневматичний збудник			
25. Матеріал електроду		26. Параметри процесу	
25.1. Тверді сплави		26.1. Імпульс струму	
25.2. Хром		26.2. Тривалість обробки	
25.3. Ніхром		26.3. Матеріал електроду	
25.4. Молібден		26.4. Сила струму	
25.5. Нікель		26.5. Частота розряду	
		26.6. Всі складові	
27. Функціональне призначення			
27.1. Зміцнення та легування поверхні			
27.2. Підвищення зносостійкості			
27.3. Підвищення корозійної стійкості			
H. Електродугове наплення			
28. Інструмент		29. Матеріал дроту	
28.1. Ручний стаціонарний		29.1. Аустенітні сталі	
28.2. Ручний переносний		29.2. Порошковий дріт	
28.3. Автоматичний		29.3. Мартенситні сталі	
30. Параметри процесу		31. Функціональне призначення	
30.1. Швидкість розплення		31.1. Забезпечення мінімальної пористості	
30.2. Потужність дуги		31.2. Підвищення зносостійкості	
30.3. Кількість газу		31.3. Підвищення витривалості на контактні навантаження	
30.4. Склад горючої суміші		31.4. Підвищення мікротвердості	
30.5. Відстань від сопла до поверхні			
30.6. Всі параметри			
I. Імпульсне іонне азотування			
32. Параметри процесу		33. Суміш реакційного газу	
32.1. Час дифузійного насичення		33.1. Аргон+Азот	
32.2. Тиск реактивного газу		33.2. Метан+Азот	
32.3. Склад реакційного газу		33.3. Азот+Метан+Аргон	
32.4. Температура газу			
32.5. Всі параметри			
34. Функціональне призначення			
34.1. Підвищення зносостійкості			
34.2. Підвищення мікротвердості			
34.3. Підвищення корозійної стійкості			
34.4. Підвищення несучої здатності			
34.5. Зниження пластичної деформації			
34.6. Відновлення без деформації і викривлення			

Рис. 2 – Морфологічна матриця формування ТП відновлювального ремонту

Для першого етапу ТП відновлювального ремонту (елемент J), від якого залежить адгезійна міцність, насиченість відновлювальної поверхні легованими елементами (корозійна стійкість), зносостійкість визначено наступні ознаки: 1 – інструмент; 2 – тип контакту інструменту з відновлюваною поверхнею; 3 – функціональне призначення ремонтної операції. Нанесення покриття методом ЕДН (елемент Н) є базовою операцією для подальшого ПА та забезпечує одну з основних характеристик, пористість покриття, та має такі ознаки: 1 – інструмент; 2 – матеріал дроту; 3 – параметри процесу; 4 – функціональне призначення ремонтної операції. Для підвищення зносостійкості, мікротвердості, корозійної стійкості, несучої здатності використовується заключна операція ТП відновлювального ремонту ПА (елемент I), для нього визначені наступні ознаки: 1 – параметри процесу; 2 – суміш реакційного газу; 3 – функціональне призначення ремонтної операції.

Для кожної з 34 морфологічних ознак вибрано основні варіанти їх реалізації (від 3 до 6). Зміна конструктивного вираження конкретного варіанту будь-якої з 34 ознак формує нову схему реалізації концепції ремонту елементів ЗТ шляхом застосування багатофункціональних покриттів нанесених комбінованим способом.

Для отримання морфологічних формул досліджуваних сполучень включаємо визначені варіанти реалізації усіх ознак відповідно до досліджуваного сполучення із властивими ним енергетичними, технологічними, експлуатаційними та економічними показниками. Недоліком методу морфологічного аналізу є то, що побудована морфологічна матриця містить велику кількість несумісних варіантів, однак великою перевагою запропонованого методу дослідження є багатоваріантність. При цьому, слід зазначити, що морфологічний метод дослідження дозволяє аналізувати різні структури об'єкту, використовуючи системний підхід. Кількість можливих варіантів реалізації концепції забезпечення надійності ЗТ та їх елементів шляхом нанесення багатофункціональних покриттів відповідно до отриманої морфологічної матриці складає:

$$N = 5 \times 4 \times 4 \times 5 \times 5 \times 6 \times 6 \times 6 \times 5 \times 4 \times 4 \times 4 \times 5 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 \times 5 \times 6 \times 3 \times 3 \times 3 \times 6 \times 4 \times 5 \times 3 \times 6 = 1,035 \times 10^{24}.$$

Для одного варіанту ТП відновлення деталей ЗТ при використанні морфологічної матриці формування ТП відновлювального ремонту:

$$N_1 = 138240.$$

Таким чином схема формування одного з варіантів реалізації концепції забезпечення надійності ЗТ та їх елементів шляхом нанесення багатофункціональних покриттів буде включати в себе наступні сполучення визначених ознак:

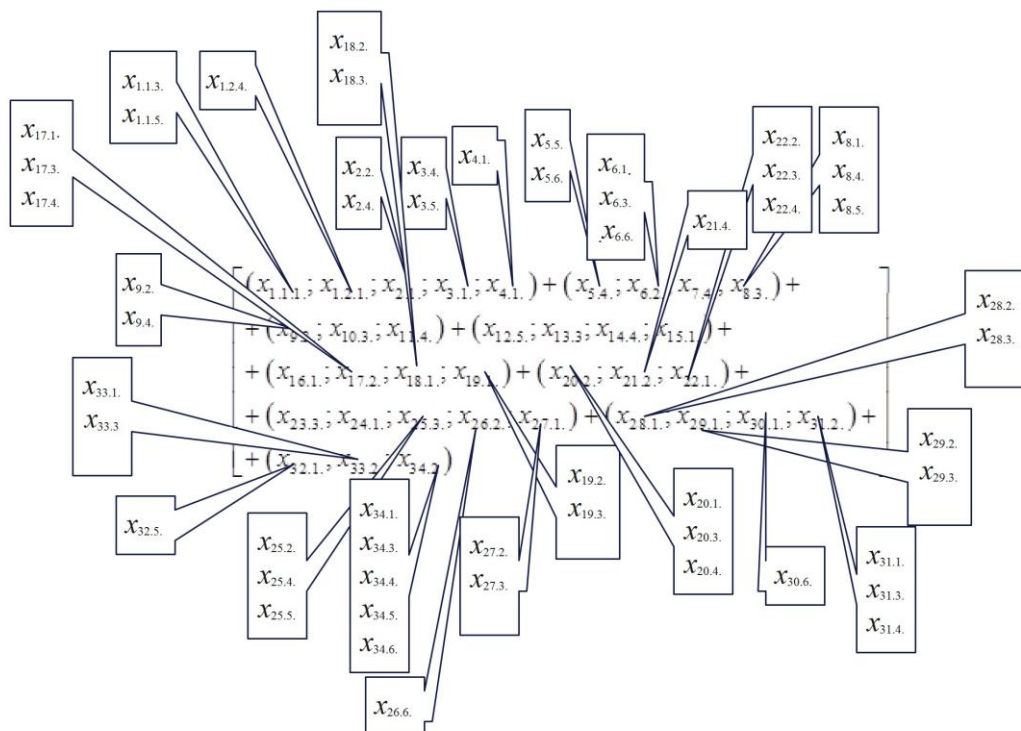
$$\left[\begin{aligned} &(x_{1.1.1.1}; x_{1.2.1}; x_{2.1}; x_{3.1}; x_{4.1}) + (x_{5.4}; x_{6.2}; x_{7.4}; x_{8.3}) + \\ &+ (x_{9.3}; x_{10.3}; x_{11.4}) + (x_{12.5}; x_{13.3}; x_{14.4}; x_{15.1}) + \\ &+ (x_{16.1}; x_{17.2}; x_{18.1}; x_{19.1}) + (x_{20.2}; x_{21.2}; x_{22.1}) + \\ &+ (x_{23.3}; x_{24.1}; x_{25.3}; x_{26.2}; x_{27.1}) + (x_{28.1}; x_{29.1}; x_{30.1}; x_{31.2}) + \\ &+ (x_{32.1}; x_{33.2}; x_{34.2}) \end{aligned} \right]$$

Для наземного транспорту ($x_{1.1.1.1}$) з двигуном внутрішнього згорання ($x_{1.2.1}; x_{2.1}$), в якому вузли та деталі призначені для передачі енергії ($x_{3.1}$) та перетворення руху ($x_{4.1}$) в процесі експлуатації зазнають навантаження крутіння ($x_{5.4}$) та працюють в агресивному середовищі ($x_{6.2}$) з порушенням технології термічної обробки ($x_{7.4}$), які працюють в зазначеному режимі навантаження ($x_{8.3}$). Для досліджуваного варіанту обрано циліндричні деталі ($x_{9.3}$) типу вал ($x_{10.3}$) з відновлюваною поверхнею ($x_{11.4}$). При формуванні ТП відновлення пошкодженої поверхні ($x_{11.4}$) шляхом використання багатофункціональних покриттів обрані наступні операції: – для підготовки відновлюваної поверхні обираємо ЕІЛ ($x_{12.5}$), який заснований на використанні концентрованого потоку енергії плазмового струменя іскрового розряду; – використання покриттів отриманих ЕДН ($x_{13.3}$), в основі якого лежить розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші; – ПА ($x_{14.4}$), головною особливістю якого є використання ефекту аномального масопереносу азоту на поверхні відновлюваної деталі, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення тліючого розряду. ПА ($x_{14.4}$) є ефективним методом вирішення проблеми обробки

відновлених поверхонь з покриттями отриманими ЕДН ($x_{13.3}$) при одночасному формуванні в них високоміцних поверхневих шарів і підвищенні їх експлуатаційних характеристик. Як альтернативний метод відновлення запропоноване вібродугове наплавлення ($x_{15.1}$). Виробничо-технічна база ремонтного виробництва з відновлення КЕ деталей ЗТ комбінованим методом, що поєднує ЕІЛ, ЕДН і ПА, в досліджуваному варіанті розглядає витрати енергетичних ресурсів на процес підготовки відновлюваної поверхні ($x_{16.1}$), розподіл праці на процес підготовки поверхні ($x_{17.2}$), вибір обладнання ($x_{18.1}$) та матеріалу ($x_{19.1}$) для ЕІЛ. Основною метою виконання стадії «технічний проект» ($x_{20.2}$) є вироблення остаточних проектних рішень щодо виробу загалом та його складових з урахуванням експлуатаційних вимог ($x_{21.2}$) при проектуванні ТП ($x_{22.3}$). Далі за допомогою морфологічної матриці ТП відновлення КЕ деталей ЗТ розглянемо основні складові комбінованої технології нанесення багатофункціональних покриттів. Процес ЕІЛ реалізували на установці «Елітрон-22», основними вузлами якої є електромагнітний збудник ($x_{23.3}$) і електрона комутуюча система [10-12] з детермінантним типом контакту інструменту ($x_{24.1}$). В якості матеріалу електроду використовуються ніхромові електроди ($x_{25.3}$) з визначеною тривалістю обробки ($x_{26.2}$), що забезпечує високу адгезійну міцність, та насиченням поверхні легуючими елементами ($x_{27.1}$). Для нанесення покриттів методом ЕДН у даному ТП використовується ручний стаціонарний апарат ($x_{28.1}$) АДН-10 з розпилювальною головкою, що швидко замінюється, з легкою і швидкою заміною дротів з одного діаметра на інший, високою електричною і термічною захищеністю, швидким доступом до всіх вузлів апарату, простими і швидкозамінними елементами для знімання струму, заміною роликів без розбирання апарату, блочно-вузловим збиранням, швидким технічним обслуговування і ремонтом [13-15]. В якості матеріалу покриття використовували дріт зі сталей аустенітного класу ($x_{29.1}$) зі встановленою швидкістю розпилювання ($x_{30.1}$) з метою підвищення зносостійкості ($x_{31.2}$). Фінішну обробку ПА проводимо з урахуванням часу дифузійного насичення ($x_{32.1}$) у суміші реакційного газу ($x_{33.2}$) для підвищення мікротвердості відновлюваної поверхні ($x_{34.2}$).

Сформований підхід дозволяє системно досліджувати усі можливі варіанти морфології ТП відновлення КЕ деталей ЗТ. Такий підхід дозволяє враховувати, крім вже відомих, ще і незвичайні варіанти, які при звичайному розгляданні могли бути втраченими. При цьому є можливість розглядати перспективні технічні рішення, які поки ще знаходяться на стадіях конструкторської і технологічної розробки.

Таким чином, реалізація наведеної концепції відновлювального ремонту дозволяє визначити та дослідити основні та супутні складові ТП, морфологічна формула якого має вигляд:



Виділена схема ТП відновлення зношених поверхонь КЕ деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим способом може бути застосована для різних видів ЗТ та забезпечувати надійність відновлених деталей в процесі експлуатації.

Висновки

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 методів, експериментальних досліджень.

2. Запропоновано загальну методологію, 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. 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.

Визначено, що сформована морфологічна матриця містить велику кількість несумісних варіантів, що є недоліком методу, однак великою перевагою його є багатоваріантність. При цьому, слід відмітити, що метод дослідження оснований на морфології об'єктів, дозволяє системно аналізувати різні структури об'єкту, що впливають із закономірностей їх будови.

Перелік використаних джерел:

1. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К. : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
2. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навчальний посібник / С.Г. Радченко. – К. : Політехніка, 2001. – 88 с.
3. Лапач С.М. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: метод. вказівки до лаб.-комп'ют. практик. для студ. спец. «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 116 с.
4. Котельников Р.Б. Анализ результатов наблюдений / Р.Б. Котельников. – М., 1986. – 144 с.
5. Агеев М.С. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту / М.С. Агеев, І.В. Гришук, Е.К. Солових // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2020. – Вип. 194. – С. 81-92. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>.
6. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів / М.С. Агеев, А.В. Рудковський, О.П. Грищенко, Е.К. Солових, С.О. Магопець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3 (285). – С. 268-277. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-285-3-43>.
7. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса судовых машин и механизмов / М.С. Агеев, А.В. Дудан, Т.В. Ворона, Б.А. Ляшенко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2015. – Вип. №4(94). – С. 18-22. – (Серія: Машиностроение).
8. Вигерина Т.В. Оценка влияния параметров газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования / Т.В. Вигерина, М.С. Агеев, К.А. Данько // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – № 1. – С. 35-40. – (Серія В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение).
9. Смоленцев В.П. Установка для электроискрового восстановления деталей / В.П. Смоленцев // Теория и практика машинного оборудования: труды Межд. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1996. – С. 137-138.

10. Источники питания для ЭИЛ / С.П. Фурсов, А.М. Парамонов, И.В. Добында, А.В. Семенчук. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 140 с.
11. Коротаев Д.Н. Система технического контроля электроискрового легирования / Д.Н. Коротаев // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения : матер. Межд. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. – Часть 1. – С. 256-259.
12. Брусило Ю.В. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей поршневых двигателей электродуговым напылением / Ю.В. Брусило // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 4(71). – С. 38-42.
13. Прядко А.С. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта электродуговым напылением / А.С. Прядко, Ю.В. Брусило // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 121-126. – (Серия: Промышленность. Машиноведение и машиностроение).
14. Лопата Л.А. Повышения качества напыленных покрытий / Л.А. Лопата // Мир Техники и Технологий. – 2005. – № 8(54). – С. 54-56.

References:

1. Radchenko S.G. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii* [Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv, ZAO «Ukrspetsmontazhproekt» Publ., 1998. 274 p. (Rus.)
2. Radchenko S.G. *Matematichne modeliuvannia ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem: navchal'nyi posibnik* [Mathematical modeling and optimization of technological systems: a study guide]. Kyiv, Politekhnik Publ., 2001. 88 p. (Ukr.)
3. Lapach S.M. *Matematichne modeliuvannia ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem: metod. vказivki do lab.-komp'ut. praktik. dlia stud. spets. «Tekhnologiiia mashinobuduvannia»* [Mathematical modeling and optimization of technological systems: method. directions to the computer lab. practitioner for students special «Mechanical Engineering Technology»]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2007. 116 p. (Ukr.)
4. Kotelnikov R.B. *Analiz rezul'tatov nabliudenii* [Analysis of observational results]. Moscow, 1986. 144 p. (Rus.)
5. Ahieiev M.S., Gritsuk I.V., Solovykh E.K. Zastosuvannia kombinovanikh tekhnologii vidnovlennia dlia pidvishchennia resursu detalei zasobiv transportu [Application of combined technology for renovation and increased resource details of means of transport]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain's'kogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu – Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 2020, vol. 194, pp. 81-92. doi: 10.18664/1994-7852.194.2020.230412. (Ukr.)
6. Ahieiev M.S., Rudkovskii A.V., Grishchenko O.P., Solovykh E.K., Magopets' S.O. Vidnovlennia detalei zasobiv transportu kombinovanim metodom nanesennia bagatofunktsional'nikh pokryttiv [Restoration of parts of means of transport by the combined method of application of multifunctional coatings]. *Visnik Khmel'nits'kogo natsional'nogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*, 2020, № 3 (285), pp. 268-277. doi: 10.31891/2307-5732-2020-285-3-43. (Ukr.)
7. Ahieiev M.S., Dudan A.V., Vorona T.V., Liashenko B.A. Primenenie gibridnykh tekhnologii dlia renovatsii i povysheniia resursa sudovykh mashin i mekhanizmov [The use of hybrid technologies for renovation and increasing the service life of ship machines and mechanisms]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie – Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Mechanical engineering*, 2015, vol. 4(94), pp. 18-22. (Rus.)
8. Vigerina T.V., Ahieiev M.S., Dan'ko K.A. Otsenka vliianiia parametrov gazotermicheskogo napyleniia pokrytii na ikh svoistva putem ispol'zovaniia metodov matematicheskogo planirovaniia [Evaluation of the influence of parameters of thermal spraying of coatings on their properties by using methods of mathematical planning]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Mashinovedenie i mashinostroenie – Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Mechanical engineering and mechanical engineering*, 2017, № 1, pp. 35-40. (Rus.)
9. Smolentsev V.P. Ustanovka dlia elektroiskrovogo vosstanovleniia detalei. *Trudy Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Teoriia i praktika mashinnogo oborudovaniia»* [Installation for electrospark

- restoration of parts. Proceedings of Int. Sci.-Techn. Conf. «Theory and practice of machinery»]. Voronezh, 1996, pp. 137-138. (Rus.)
10. Fursov S.P., Paramonov A.M., Dobynda I.V., Semenchuk A.V. *Istochniki pitaniia dlia EIL* [Power supplies for EIL]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1983. 140 p. (Rus.)
 11. Korotaev D.N. Sistema tekhnicheskogo kontroliia elektroiskrovogo legirovaniia. *Materiali Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Innovatsionnye materialy i tekhnologii: dostizheniia, problemy, resheniia»* [Technical control system for electrospark alloying. Proceedings of Int. sci.-tech. conf. «Innovative materials and technologies: achievements, problems, solutions»]. Komsomolsk-on-Amur, 2013, vol. 1, pp. 256-259. (Rus.)
 12. Brusilo Iu.V. Vybora oborudovaniia dlia uprochneniia i vosstanovleniia detalei porshnevnykh dvigatelei elektrodugovym napyleniem [Selection of equipment for hardening and restoration of piston engine parts by electric arc spraying]. *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia – Aerospace Engineering and Technology*, 2010, № 4(71), pp. 38-42. (Rus.)
 13. Priadko A.S., Brusilo Iu.V. Vybora oborudovaniia dlia uprochneniia i vosstanovleniia detalei avtomobil'nogo transporta elektrodugovym napyleniem [Selection of equipment for hardening and restoration of automotive transport parts by electric arc spraying]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Promyshlennost'. Mashinovedenie i mashinostroenie – Bulletin of Polotsk State University. Series: Industry. Mechanical engineering and mechanical engineering*, 2014, № 3, pp. 121-126. (Rus.)
 14. Lopata L.A. Povysheniia kachestva napylennykh pokrytii [Improving the quality of sprayed coatings]. *Mir Tekhniki i Tekhnologii – World of Engineering and Technology*, 2005, № 8(54), pp. 54-56.

Рецензент: О.В. Шарко

д-р техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія

Стаття надійшла 15.05.2022