

УДК 621.793.620.172

## ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Канд. техн. наук М. С. Агеєв, доктори техн. наук І. В. Грицук, Е. К. Солових

## APPLICATION OF COMBINED TECHNOLOGY FOR RENOVATION AND INCREASED RESOURCE DETAILS OF MEANS OF TRANSPORT

PhD (Tech.) M. Ahieiev, Dr. Sc. (Tech.) I. Gritsuk, Dr. Sc. (Tech.) E. Solovykh

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>

*Анотація.* Подано поєднання різних первинних технологій нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту. В даний час перспективними є комбіновані методи нанесення багатофункціональних покриттів (інтегровані, гібридні технології), методи нанесення покриттів у поєднанні з методами модифікування, нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів; розвиток комбінованих (інтегрованих, гібридних) багатоопераційних технологій. В умовах зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей і вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективними є комбіновані методи відновлення поверхонь.

*Ключові слова:* інтегровані технології, гібридні технології, електродугове напилення, електроіскрове легування, іонне азотування в імпульсному режимі.

*Abstract.* It presents various combinations of primary hardfacing technology for the renovation and improvement of the resource details of ship machinery. Currently, promising are integrated or combined methods hard facing (hybrid technology) coating in conjunction with the modification, the application of multi-layer, multi-functional coatings; development of integrated multioperational technologies. In all conditions, increasing scarcity of expensive alloying materials included in the composition of steels requiring high strength properties of the complex, are promising hybrid technology peening (restore) the surfaces of mild steel

Combinations of various primary technologies of application of multipurpose coverings for restoration and increase of a resource of details of knots and units of vehicles are presented. Currently promising are combined methods of application of multifunctional coatings (integrated, hybrid technologies), methods of coating in combination with methods of modification, application of multilayer, multifunctional coatings; development of combined (integrated, hybrid) multi-operational technologies. In the conditions of growing shortage of expensive alloying materials which are a part of the steels demanding a high complex of properties of durability, the combined methods of restoration of surfaces are perspective.

At present, a methodology for the synthesis of combined multi-operational technologies has not been developed. An empirical-intuitive approach prevails in the combination of multifunctional coating restoration methods. The optimal choice of restoration methods and their sequence is determined by the increase of hardness, complex of mechanical properties, wear resistance, as well as the roughness of the restored surface and the accuracy of the dimensions of the restored part. In the first-best case of combined (hybrid) methods of recovery, the criterion of choice is the comparison of costs and increase the set of mechanical properties of the recoverable parts of components and units of vehicles [13-14].

*Each method of recovery has its niche of optimal conditions of use, including even the technological traditions that have developed in a particular enterprise. The decisive factor in the choice of primary methods of applying multifunctional coatings in the combined restoration process is the presence of certain types of equipment at the enterprise and the ability to integrate them into a single technological cycle. In order to restore vehicle parts with multifunctional coatings with high adhesion strength, hardness and wear resistance, we have proposed a combined (integrated) technology that includes electric arc spraying, electrospark doping and pulsed ion nitriding.*

**Key words:** *integrated technology, hybrid technology, electric arc spraying, electric-spark doping, ion nitriding temperature cycling.*

**Вступ.** Розвиток сучасного вітчизняного транспорту (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення) нерозривно пов'язаний з проблемою підвищення довговічності деталей його вузлів та агрегатів. Більшість відмов засобів транспорту відбувається в результаті поверхневого руйнування і в першу чергу від зношування. Причиною, яка зумовлює зниження надійності робочих параметрів транспортних засобів, є знос їх деталей. Ремонтні транспортні підприємства витрачають більше 40 % металу на виготовлення запасних деталей різних вузлів та агрегатів засобів транспорту (ЗТ). Знос поверхонь деталей, що сполучаються, знаходиться в межах 0,5 ... 2,0 мм [1–4]. Розробку ефективних способів боротьби із зносом, збільшення довговічності деталей з метою підвищення ресурсу засобів транспорту можна віднести до однієї з важливих проблем транспортної галузі [1–4].

Дослідження у галузі тертя, зношування і принципово нових матеріалів та багатофункціональних покриттів є передумовою для створення на цій основі нових способів і технологій відновлення та ремонту деталей вузлів та агрегатів ЗТ, спрямованих на вирішення питань збільшення довговічності їх швидкозношуваних деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із шляхів підвищення працездатності деталей ЗТ і захисту контактних поверхонь від зносу і корозії є нанесення багатофункціональних покриттів на їх робочі поверхні [5]. Характерною особливістю технологій нанесення

покриттів є те, що не вдається отримати одночасне підвищення всіх властивостей деталі для всіх режимів експлуатації. Навіть один і той самий матеріал покриття, але нанесений різними способами, показує різні експлуатаційні властивості. Для усунення цього недоліку при проектуванні покриттів використовують два методи [6]:

1) створення багатошарових покриттів аж до мультиплікації; кожен шар у багатошаровому покритті виконує власну функцію і забезпечує плавний перехід фізико-механічних властивостей від поверхні покриття до відновлюваної поверхні деталі;

2) створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття.

Обидва методи значно здорожують технологію отримання покриття і знижують надійність отримання покриття високої якості, так як брак в одному з шарів призводить до зниження якості всього покриття.

У спробах усунення недоліків цих методів отримання покриттів спостерігаються дві основні тенденції [6]:

- нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів;

- розвиток комбінованих (інтегрованих, гібридних) багатоопераційних технологій.

З комбінованих (інтегрованих) технологій найбільший ефект за несучою здатністю забезпечують дуплексні покриття, що поєднують попереднє глибоке іонне азотування і зовнішній тонкий шар надтвердого вакуум-плазмового покриття. Така комбінована технологія забезпечує 10-кратне підвищення довговічності клапанів, які виготовлені зі сталі 12X18H10T і

експлуатуються в умовах високих контактних тисків і агресивних технологічних середовищах [6]. Знаходять застосування комбіновані (інтегровані) технології у комбінації лазерного легування (ЛЛ) і хіміко-термічної обробки (ХТО) [7-8]. Ця комбінація дозволяє отримувати за рахунок утворення зміцнюючих дисперсних фаз твердість до 20 ГПа і призводить до збільшення зносостійкості в 1,5–3 рази в порівнянні з азотованими нітрошарами сталі 38Х2МЮА [9]. Азотований шар, попередньо легований хромом (Cr) і ванадієм (V), має твердість 16–18 ГПа. Лазерне легування алюмінієм забезпечує сильно розвинену полігонізовану структуру, що прискорює дифузію азоту. При цьому твердість досягає 21 ГПа [10]. У порівнянні з технологіями газового азотування (ГА) або дискретно-лазерною обробкою (ЛО) зносостійкість за допомогою такої комбінованої (інтегрованої) технології підвищується в 2,5 рази [11]. Попередня дискретна лазерна обробка робить істотний внесок у процес подальшого газового азотування [11]. При цьому якісний і кількісний характер змін в азотованому шарі визначається заздалегідь сформованим структурно-фазовим станом. Підвищена розчинність азоту в кристалічній решітці сталі при обробці її поверхні лазерним променем є наслідком утворення високої щільності рухомих дислокацій, а також сильного диспергування вихідної структури зерен. При цьому процес насичення поверхні азотом прискорюється в 17 разів [12].

Перспективним є відновлення комбінованими методами нанесення багатофункціональних покриттів, нанесення покриттів з їх механічною обробкою (МО), нанесення покриттів з модифікуванням відновлюваних поверхонь тощо [13–14]. Комбіноване відновлення деталей засновано на використанні двох або трьох методів відновлення, кожен з яких дозволяє підвищити їхні експлуатаційні властивості. Застосовують комбінації наплавлення і хромування [13–14],

наплавлення і поверхневого пластичного деформування (ППД) [13–14], газотермічне напилення (ГН) з оплавленням [15–16]. Використовують комбінацію гальванічних покриттів і подальшу хіміко-термічну обробку [17–18], двошарове хромове покриття з наступною механічною обробкою [13–14]. Підвищують триботехнічні характеристики композиційних електролітичних покриттів лазерною обробкою [19], ультразвуковою обробкою (УЗО) [13–14], іонним азотуванням (ІА) [18]. При ультразвуковій обробці розмір зерен в покритті залежить від інтенсивності обробки, змінюючись від 45 до 24 нм [13–14]. Іонне азотування підвищує зносостійкість при абразивному зношуванні за рахунок перетворення електрично-осажденного хрому (Cr) в нітрид хрому ( $Cr_2N$ ) [17–18]. Визначено механізм впливу термообробки (ТО) на зміцнення електрично-осажденного Fe-V-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості [17–18]. Технологія відновлення зношених деталей електролітичним залізненням з подальшою нітроцементациєю забезпечує високі експлуатаційні характеристики: міцність зчеплення, зносостійкість, втомну міцність [17]. Ефективним є сульфювання електрично-осажденного Fe-V-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості і зниження коефіцієнта тертя [13–14]. Комбінація лазерної обробки з іонним азотуванням істотно збільшує здатність сталей до азотування, глибину зміцненої зони і підвищує зносостійкість [9], забезпечує підвищення твердості в порівнянні з іонним азотуванням. Електроіскрове легування, як і лазерні технології, належить до способів, які використовують висококонцентровані джерела енергії. Тому ефективною є комбінація електроіскрового легування з подальшим іонним азотуванням [5–6]. Цим істотно збільшується глибина шарів підвищеної твердості. А ось комбінація лазерної (ЛО) та електроіскрової обробки забезпечує незначний ефект [5–6].

Зазначають істотне підвищення зносостійкості модифікуванням відновлюваних поверхонь з покриттями шляхом поєднання методів іонної, електронно-променевої і лазерної обробки [5, 6]. У комбінаціях технологій електроіскрової, лазерної та електронно-променевої обробки з іонним азотуванням спостерігається ефект неадитивної.

Попередня обробка цими первинними технологіями істотно збільшує здатність сталей до азотування, глибину зміцненого шару і забезпечує багаторазове підвищення твердості і зносостійкості в порівнянні з іонним азотуванням.

За даними Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона, в США і Західній Європі комплексні або комбіновані методи нанесення покриттів отримали назву «гібридні процеси» зміцнення [6]. У даний час у практиці відновлення застосовуються такі «гібридні процеси» [5–6], що поєднують:

- хіміко-термічну обробку з поверхневим пластичним деформуванням (азотування з наклепом дробом, азотування з холодним накатуванням, цементування з поверхневим пластичним деформуванням, зокрема наклепом дробу);

- хіміко-термічну обробку з наступною електроконтактною обробкою (легування бором і вуглецем з подальшою електроконтактною обробкою);

- волочіння при впливі імпульсів струму (волочіння з електричним стимулюванням);

- газотермічне напилення з подальшою холодною прокаткою;

- електромагнітне наплавлення з термомеханічною обробкою;

- поверхнєве пластичне деформування з дифузійним насиченням (прокатка з дифузійним насиченням при газовій цементації);

- поверхнєве пластичне деформування з пічним нагрівом або електричним (струменеву обробку дробом з електричним нагріванням);

- поверхнєве пластичне деформування з електрично-імпульсною обробкою (електрично-імпульсне деформування при прокатці);

- поверхнєве пластичне деформування з мікродуговим оксидуванням;

- лазерне гартування з поверхневою пластичною деформацією;

- плазмове напилення з гарячим ізостатичним пресуванням;

- газотермічне напилення з вібраційною обробкою або нагріванням;

- цементацію з подальшим струменевим зміцненням дробом;

- лазерне гартування або легування з поверхневою пластичною деформацією;

- лазерне легування з ультразвуковою обробкою;

- ультразвукову обробку з нанесенням газотермічних покриттів;

- лазерну обробку з плазмовим напиленням покриттів;

- електронно-променеву обробку електролітичних хромових покриттів;

- електронно-променеве нагрівання з детонаційним напиленням покриттів;

- лазерну обробку з іонним азотуванням;

- лазерну обробку з боруванням;

- цементацію з лазерним гартуванням;

- лазерне легування з хіміко-термічною обробкою.

**Визначення мети та завдання досліджень.** Дати характеристику комбінованих технологій відновлення, а також показати перспективу їх розвитку. Запропонувати комбінований спосіб підвищення ресурсу та відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту.

Для досягнення визначеної мети потрібно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту;

- запропонувати спосіб первинної обробки відновлюваної поверхні для підвищення міцності зчеплення;

- для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів транспортних засобів запропонувати комбіновану технологію електродугового напилення в комбінації з електроіскровим легуванням і імпульсним іонним азотуванням.

**Основна частина дослідження.** В даний час ще не розроблена методологія синтезу комбінованих багатоопераційних технологій. У комбінації методів відновлення багатофункціональними покриттями переважає емпірично-інтуїтивний підхід.

Слід зазначити 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. Попередню хіміко-термічну обробку доцільно використовувати для підготовки поверхні під електроіскрове легування, а фінішне електроіскрове легування цементованих і азотованих поверхонь забезпечує додаткове підвищення твердості і зносостійкості [5–6]. Різна послідовність електроіскрового легування і азотування дозволяє управляти розподілом мікротвердості в легуваному шарі, а саме – становищем максимуму в приповерхневому шарі [5–6]. Зауважують інверсію в комбінації лазерної обробки і іонного азотування [9]. Лазерна обробка азотованого шару забезпечує більш щільний оксинітридний шар під відновлюваною поверхнею, а також збільшення глибини азотованого шару [5, 9]. У наноструктурованому поверхневому шарі після шліфування азотований шар удвічі товщий, ніж на крупнозернистій поверхні в тих же умовах азотування, що пояснюється прискоренням дифузії азоту уздовж границь зерен в наноструктурному матеріалі поверхневого

шару, що відновлюється [9]. Фінішна струменева обробка дробом азотованого шару підвищує зносостійкість і межу витривалості зубчастих передач [20].

У першій-ліпшій нагоді комбінованих (інтегрованих, гібридних) методів відновлення критерієм вибору є порівняння витрат і збільшення комплексу механічних властивостей відновлюваних деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту [13–14].

Кожний метод відновлення має свою нішу оптимальних умов використання, включаючи навіть технологічні традиції, що склалися на конкретному підприємстві. Вирішальним фактором у виборі первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів у комбінованому процесі відновлення є наявність на підприємстві окремих видів устаткування і можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл.

З різноманіття первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів – наймасовіші технології, що застосовуються в ремонті – газотермічні методи напилення [21–23]. Упровадження газотермічних методів напилення на ремонтних підприємствах почало розвиватися в кінці 80-х років минулого століття. У галузі ремонту транспортних засобів у 80-ті роки створювалися ділянки з відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту плазовими, детонаційними, газополумєневими і електродуговими покриттями. Однак у 90-ті роки у зв'язку зі зміною економічного становища в Україні впровадження газотермічного напилення при відновленні деталей ЗТ практично припинилося. Плазове і детонаційне напилення, на яке робилася основна ставка в підвищенні ресурсу деталей вузлів та агрегатів ТЗ, вимагало великих витрат: висока вартість обладнання, застосування дорогих газів. Відсутність достатнього науково-технологічного забезпечення і кваліфікованих кадрів призвела практично до зупинки робіт з відновлення деталей методами газотермічного напилення. За кордоном в цей час інтенсивно проводилися роботи із

застосування методів ГТН, розроблялось нове обладнання для напилення, наприклад, надзвукові системи, за допомогою яких отримують покриття з високою міцністю. Вартість цих систем у 5...10 разів перевищує номінальну вартість серійного обладнання вітчизняного виробництва.

Апарати для електродугового напилення вітчизняного виробництва відрізняються простотою, дешевизною і високою продуктивністю [24]. У зв'язку з цим упровадження електродугового напилення для підвищення ресурсу та відновлення деталей ЗТ з метою забезпечення змінно-запасними частинами ремонтних підприємств є актуальним.

Електродугове напилення може бути застосовано для відновлення зношених чавунних, високовуглецевих і високолегованих сталевих деталей циліндричної форми зі зношеними посадочними місцями і деталей плоскої форми з кольорових металів, які працюють в умовах тертя ковзання і мастила, захисту від корозії зовнішніх і внутрішніх поверхонь резервуарів і зварних металоконструкцій різного призначення шляхом напилення алюмінієм і цинком [24]. Методом електродугового напилення відновлюються розміри опорних шийок розподільних і колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання [25].

Високі властивості покриттів при електродуговому напиленні досягаються застосуванням композиційних порошкових дротів. До них можна віднести порошковий дріт ФМІ, розроблений у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів, Україна) [26–27]. Захист від окиснення і високі властивості відновлюваних поверхонь з цими покриттями досягаються за рахунок взаємодії компонентів порошкової шихти між собою, при цьому відбуваються процеси відновлення оксидів і легування сталеві основи. При ЕДН технологічно можливе застосування будь-якої марки дроту, що випускається промисловістю для різних цілей. Однак найчастіше

застосовують композиційні порошкові дроти, оболонка яких виготовлена зі сталей Св08, Св08Г2С, 30ХГСА, сталь 70, У8, У10, 20Х13, 40Х13, 65Г, а наповнювач – феросплави, карбіди, карбобориди. Відновлювані поверхні з покриттями, отриманими напиленням порошкових дротів, мають велику твердість і зносостійкість. Практика застосування порошкових композиційних дротів при відновленні електродуговим напиленням показує, що експлуатаційні властивості відновлюваних поверхонь з покриттями із порошкових дротів вище, ніж з гомогенних. Переваги порошкових дротів обумовлюються не тільки гетерогенною структурою відновлюваної поверхні з покриттям після напилення, а й активною взаємодією компонентів порошкової шихти один з одним при напиленні і з відновлюваною поверхнею, що сприяє підвищенню температури частинок, розкисненню оксидів на відновлюваній поверхні і, як наслідок, підвищенню адгезії покриття до поверхні деталі. Однак таке зменшення розмірів розплавлених частинок напилюваного матеріалу веде до менш інтенсивного вигорання з них легуючих елементів, у першу чергу вуглецю, що обумовлює підвищену твердість покриттів. Наші дослідження показали, що підвищення вмісту вуглецю в композиційному дроті, що розпилється, сприяє підвищенню механічних властивостей відновлюваної поверхні з покриттям.

При напиленні маловуглецевих нелегованих дротяних матеріалів покриття має низький рівень механічних властивостей. Твердість металу і оксидів різна і становить 210 ... 280 НV і 400 ... 560 НV відповідно. Покриття характеризується високою внутрішньою крихкістю через наявність великої кількості оксидів (до 20 %), високим коефіцієнтом тертя ( $f = 0,4...0,6$ ) і невисокою зносостійкістю [27]. Міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею деталі не перевищує 22 ... 24 МПа. Пористість покриття знаходиться в

діапазоні 13...18 %. Структура покриттів має вигляд шаруватої системи, що складається з витягнутих зерен (ламелей), фазовий склад яких відповідає твердому розчину хрому в  $\alpha$ -залізі з дисперсними включеннями складнолегованих боридних сполук хрому і заліза.

Використання легованих та високолегованих матеріалів дає змогу отримувати найкращі властивості покриттів з гомогенних дротяних матеріалів методом електродугового напилення [29]. Отримання покриттів з підвищеними властивостями обумовлено зміцнювальною дією легуючих елементів у сталі. При значному вмісті хрому у вихідному дроті в покритті утворюються карбіди  $Cr_{23}C_6$ , а також невелика кількість аустеніту. Хром у значній мірі підвищує корозійну стійкість покриття, а також адгезію покриття до мастила. На міцність зчеплення покриттів хром у чистому вигляді впливу не надає. При електродуговому напиленні хром практично не вигоряє. Нікель широко застосовують у сплавах для захисних покриттів, він необмежено розчинний у залізі і є сильним аустенізуючим елементом. Власних високотвердих фаз у 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. Нікель – дорогий легуючий елемент, тому його кількість у зносостійких сплавах на основі заліза обмежують. Виняток становлять сплави для корозійно-стійких покриттів, у яких нікель застосовують як основу сплаву. В цьому випадку досягаються високі корозійна стійкість і зносостійкість, а також технологічність нанесення покриття завдяки утворенню в системі М-Сr-В гетерогенної структури евтектичного типу з низькою температурою плавлення (менше 1000 °С). Однак високолеговані дровові матеріали за вартістю наближаються до порошкових дровових матеріалів.

Головні недоліки напилених покриттів – низька міцність зчеплення і висока пористість [28–29]. Покращують ці властивості лазерною, електронно-променевою і хіміко-термічною обробкою [30–38]. Найбільш численні дослідження – з лазерної обробки покриттів [30–33]. Проаналізовано галузі використання лазерного поліпшення властивостей напилених покриттів. Завдяки оптимізації параметрів лазерної обробки напилених електродугових покриттів отримують мікрокристалічну безпористу структуру з рівномірним розподілом хімічних елементів. Цим істотно підвищується зносостійкість в умовах граничного тертя і абразивного зношування. Досягають підвищення адгезійної і когезійної міцності покриттів при їх наноструктуруванні. Лазерна обробка напилених покриттів підвищує їхню стійкість до високотемпературної газової корозії і корозії у розплаві  $V_2O_5 + Na_2SO_4$ . З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб легування поверхні спільною обробкою лазерним променем і плазмою [34]. Лазерне оплавлення напилених покриттів збільшує мікротвердість у 2 рази, зносостійкість в 1,3–1,8 рази. Оплавлення напилених покриттів здійснюють струмами високої частоти, високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем, у вакуумних пічках [34–35]. Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості і зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка напилених покриттів [36–37]. Аналіз структури показав, що середній розмір зерна в покритті зменшується від сотень мікрометрів до сотень нанометрів, а мікротвердість збільшується в 5 раз. Межа витривалості підвищується на 60–80 %, а міцність зчеплення – у 2,5...3,5 рази після електронно-променевої обробки [36–37]. Для підвищення триботехнічних характеристик напилених покриттів використовують ультразвукову обробку, в тому числі одночасно з плазмовим

напиленням [29]. Ефективним є застосування хіміко-термічної обробки після напилення. Після борування зносостійкість напилених покриттів зі сталі Св-08 при сухому терті підвищується в 10 раз. Підвищується також адгезійна міцність напилених покриттів. Іонне азотування напилених покриттів із сталей 40X13 і X18N10T забезпечує їхню мікротвердість від 6,5 до 15 ГПа. При цьому зносостійкість збільшилася у 8 разів [29].

В умовах зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей і вимагають високого комплексу властивостей міцності,

перспективними для електродугового напилення є маловуглецеві низьколеговані сталі. При електродуговому напиленні відбувається вигорання вуглецю і зниження твердості і зносостійкості покриттів.

З метою використання при ЕДН дешевих сталей, але при цьому для отримання покриттів з високою міцністю зчеплення, твердістю і зносостійкістю нами була запропонована комбінована (інтегрована) технологія (рисунок) електродугового напилення попередньою електроіскровою обробкою (ЕІО) з подальшою їх фінішною обробкою іонним азотуванням в імпульсному режимі.



а



б



в



г



д



ж

Рис. Приклад комбінованого методу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів: а, б – електроіскрове легування; в, г, д – електродугове напилення; ж – імпульсне іонне азотування



При відновленні деталей електродуговим напиленням необхідна попередня обробка відновлюваних поверхонь для видалення забруднень і забезпечення надійного контакту розпилюваного матеріалу покриття з матеріалом відновлюваної поверхні деталі. Попередня обробка відновлюваних поверхонь деталей виконується різноманітними технологічними методами. На першій стадії підготовки поверхні

проводиться знежирення для видалення різних забруднень. Далі виконується механічна обробка відновлюваних поверхонь для видалення дефектного шару. Після механічної обробки для підвищення адгезійної міцності напилених покриттів з відновлюваною поверхнею використовують обробку дробом, обдування піском, нарізання рваної різи, нанесення різної форми насічок (таблиця).

Таблиця

Вплив способів підготовки поверхні для напилення покриттів на міцність зчеплення і ефективний коефіцієнт концентрації напружень

Спосіб підготовки	Міцність зчеплення, МПа	Ефективний коефіцієнт концентрації напружень
Обробка дробом	20	0,78
Обдування піском	19	0,91
Нарізання рваної різи	23	1,3
Нанесення різної форми насічок	22	1,29
Електроіскрова обробка	23	1,08

При розробці комбінованої технології електродугового напилення (ЕДН) з подальшою обробкою іонним азотуванням в імпульсному режимі (ІА) була запропонована попередня обробка поверхонь перед напиленням електроіскровим легуванням або електроіскровою обробкою. Запропонований комбінований метод, що включає електроіскрове легування, електродугове напилення та імпульсне іонне азотування для відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту, подано на рисунку.

**Висновки.** Як показує вітчизняний і зарубіжний досвід, відновлення деталей засобів транспорту найбільш ефективно шляхом нанесення на їх відновлювані поверхні багатофункціональних покриттів комбінованими (інтегрованими, гібридними) методами. Створення технологічних процесів відновлення комбінованими (інтегрованими, гібридними) методами є досить актуальним завданням і може

зробити ремонтне виробництво рентабельним.

Запропоновано для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів транспортних засобів використовувати вперше розроблену комбіновану (інтегровану, гібридну) технологію електродугового напилення в комбінації з електроіскровим легуванням і імпульсним іонним азотуванням. Запропонована комбінована технологія має низку переваг:

- забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей відновлюваної поверхні з покриттям, зокрема, міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею, щільність, твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. Електроіскрове легування несе функцію попередньої обробки відновлюваної поверхні перед напиленням покриття і підвищує його міцність зчеплення. Операцію імпульсного іонного азотування напиленого покриття можна поєднати з фінішною обробкою до

необхідної твердості, зносостійкості і чистоти відновлених поверхонь деталей;  
- дає змогу зменшити вартість процесу відновлення деталей за рахунок зниження

вартості покриттів шляхом заміни дорогих порошкових дротів на дешевші низьколеговані вуглецеві сталеві дроти.

### Список використаних джерел

1. Кузьмин А. А. Судостроение и судоремонт: сб. науч. трудов С.-Петербург. гос. ун-т вод. коммуникаций. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУВК, 2000. 189 с.
2. Бочкарев В. Н., Яхьяев Н. Я. Технологическая наследственность в управлении качеством судовых машин и механизмов: монография / Дагестанский филиал АН СССР. Махачкала, 1990. 200 с.
3. Половинкин В. Н. Новые высокие технологии на пути к внедрению в судостроении. Успехи ожидаемые и неожиданные: материалы конференции. Санкт-Петербург: «Моринтех», 2001. С. 9–10.
4. Сторожев В. П. Восстановление деталей судовых технических средств. *Судоремонт*. 1990. 1(17). С. 1–60.
5. Покрытия и их использование в технике: в кн. Прочность материалов и конструкций / под ред. В. Т. Трощенко. Изд 2-е. Киев: Академперіодика, 2006. С. 981–1074.
6. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий / Б. А. Ляшенко, Л. А. Лопата, Е. К. Соловых, А. Е. Соловых, А. В. Ворона. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2011. Вип. 41. Ч. 2. С. 73–79.*
7. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою / А. О. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук та ін. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Київ: НАУ, 2008. Вип. 49. Т. 2. С. 61–65.*
8. Лахтин Ю. М., Чудина О. В. Химико-термическая обработка лазернолегированных сталей. *Изв. вузов. Серия: Чер. металлургия*. 1997. № 9. С. 64–67.
9. Чудина О. В. Азотирование лазернолегированных сталей: сб. матер. 4 Собр. металлословесов России (Пенза, 23-25 сент., 1998). Пенза, 1998. Ч. 1. С.90–91.
10. Kunlin Wang, Zhirui Tian, Chongbin Yang et al. Повышение износостойкости сплавов Al-Si лазерной переплавкой. *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals*. 1994. № 10. С. 3–5.
11. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко та ін. *Пробл. тертя та зношування: наук.-техн. зб. Київ: НАУ, 2008. Вип. 50. С. 5–15.*
12. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів: п ат. 25412 Україна, С23С 8/02. / Кіндрачук М. В., Іщук Н. В., Писаренко В. М. та ін. Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
13. Комбинированные электротехнологии защитных покрытий / В. С. Чередниченко, В. Г. Радченко, Т. Б. Радченко и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 260 с.
14. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смолянцев и др. Москва: Машиностроение, 1991. 114 с.
15. Подчерняева И. А. Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита. *Технология и организация производства*. 1992. № 2. С. 42–43.
16. Голубев В. С., Иванов И. А., Чеботько И. С. Лазерное оплавление газотермических покрытий. *Разраб. и применение технол., оборуд. и матер. для газотерм. процессов нанес. защитн. покрытий: тез. науч.-практ. конф. (Минск, 5-6 июня, 1990)*. Минск, 1990. 38 с.

17. Чернявский Д. А. Повышение эксплуатационных характеристик железных электролитических покрытий нитроцементацией: автореф. дисс... канд. техн. наук. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2007. 15 с.
18. Сафронов Р. И. Электроосаждение железобетонных покрытий и их термическая обработка: автореф. дисс... канд. техн. наук. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2007. 17 с.
19. Семенова Н. Е., Игнатов М. Н. Методика нанесения композиционных электрохимических покрытий для лазерного модифицирования поверхности. *Вестн. ПГТУ. Мех. технол. матер. и конструкций*. 2003. № 6. С. 28–30.
20. Быковский Н. Г., Сорокина Л. М., Филимонов Г. Н. Повышение долговечности зубчатых передач совмещением азотирования и поверхностного пластического деформирования. *Нов. стали и сплавы, режимы их терм. обраб.:* матер. науч.-техн. семин. / О-во «Знание» РСФСР. Ленингр. дом науч.-техн. проп. Ленинград, 1991. С. 34–35.
21. Дубчак В. С. Опыт Мурманского СРЗ по восстановлению деталей методами газотермического напыления. В/О «Мортехинформреклама». Серия: Судоремонт. Москва, 1987. Вып. 20. С. 1–10.
22. Корнев А. Б., Березин Е. К., Глебова М. А. Опыт применения газотермических покрытий при ремонте узлов трения крупногабаритного энергетического оборудования. *Компрессорная техника и пневматика*. 2002. № 11. С. 24–29.
23. Корнев А. Б. Разработка стратегии ремонта трибосопряжений крупногабаритных деталей с применением газотермического напыления в судоремонтном производстве: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.08.04 / Корнев Андрей Борисович. Н.Новгород, 2006. 23 с.
24. Применение активированной электродуговой металлизации для нанесения антикоррозионных покрытий / Н. Н. Дорожкин, В. Э. Барановский, А. П. Елистратов, А. С. Прядко. *Морской транспорт*. Серия: Судоремонт. 1985. Вып. 2(531). С. 9–12.
25. Сергеев В. В., Спиридонов Ю. Л., Фарахшин И. И. Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металлизацией. *Сварочное производство*. 2004. № 2. С. 44–26.
26. Порошковые проволоки систем FeCrV+Al и FeCrV+Al+C для электродуговой металлизации / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунук и др. *Автоматическая сварка*. 2002. № 3. С. 32–35.
27. Опыт применения порошковой проволоки ФМИ-2 для электрометаллизационного нанесения восстановительных покрытий / В. И. Похмурский, И. И. Сидорак, М. М. Студент. *Автоматическая сварка*. 2002. № 2. С. 3–4.
28. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. Москва: Машиностроение, 1985. 239 с.
29. Витязь П. А., Азизов Р. О., Белоцерковский М. А. Упрочнение газотермических покрытий. Минск: Бестпринт, 2004. 192 с.
30. Похмурська Г. В., Довгунук В. М., Студент М. М. Зносостійкість лазерно-модифікованих электродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2. *ФХММ*. 2003. 39. № 4. С. 61–64.
31. Влияние лазерного воздействия на микроструктуру и фазовый состав плазменно-напыленных покрытий на основе никеля / В. А. Клименов, В. П. Безбородов, О. Б. Перевалова и др. Прочн. и пластич. матер. в условиях внеш. энерг. воздействия: тез. докл. 4 Междунар. конф. (Новокузнецк, 11-16 сент., 1995). Новокузнецк, 1995. 292 с.
32. Анциферов В. Н., Шмаков А. М., Ившина Н. Н. Лазерная обработка плазменно-напыленных на порошковую сталь покрытий. *Порошк. металлургия*. 1992. № 10. С. 25–28.
33. Микроструктура плазменного покрытия на алюминиевом сплаве после лазерной обработки / Liang G., Li C., Su J. et al. *Chin. J. Nonferrous Metals*. 1998. 8. № 1. С. 28–32.

34. Станчков Д. И., Винокуров А. В., Бухтояров В. Н. Оплавление газотермических покрытий плазмотроном с модуляцией его параметров / Деп. в ВИНТИ 31.10.2001, № 2289-В2001.

35. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом / М. А. Глебова, А. Б. Корнев, В. В. Глебов и др. *Сварочное производство*. 2004. № 6. С. 3–46.

36. Шипко А. А., Урбан И. Г. Влияние электронно-лучевого нагрева на структуру и свойства детонационных покрытий. *Весці АН Беларусі*. Сер. фіз.-тэхн. н. 1992. № 4. С. 8-14.

37. Прохоренкова Н. В. Структура и свойства покрытий на основе Ni, нанесенных плазменном струей и подвергнутых электронному облучению. *Физика и химия наноматериалов*: сб. матер. междунар. школы – конф. мол. ученых (Томск, 13-16 дек., 2005). Томск: ТГУ, 2005. С. 118–120.

---

Агеев Максим Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>. +380955871309. E-mail: [maxageev73-73@ukr.net](mailto:maxageev73-73@ukr.net).

Грицук Ігор Валерійович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7065-6820>. +380666983739. E-mail: [gritsuk\\_iv@ukr.net](mailto:gritsuk_iv@ukr.net).

Солових Євген Костянтинівич, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету. ORCID: 0000-0002-6561-6974. +380973974433. E-mail: [ekskntu09@gmail.com](mailto:ekskntu09@gmail.com).

Ahieiev Maksym, PhD (Tech). Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, department of ship power plant operation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>. +380955871309. E-mail: [maxageev73-73@ukr.net](mailto:maxageev73-73@ukr.net).

Gritsuk Igor, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Kherson State Maritime Academy, department of ship power plant operation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7065-6820>. +380666983739. E-mail: [gritsuk\\_iv@ukr.net](mailto:gritsuk_iv@ukr.net).

Evgen Solovykh, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of operation and repair of machines Central Ukrainian National Technical University. ORCID: 0000-0002-6561-6974. +380973974433. E-mail: [ekskntu09@gmail.com](mailto:ekskntu09@gmail.com).

Статтю прийнято 26.11.2020 р.