

УДК 621.793.620.172

DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18973

О.В. ЛОПАТА<sup>1</sup>, В.М. ЛОПАТА<sup>2</sup>, Є.К. СОЛОВИХ<sup>3</sup>, Н.І. ПОСВЯТЕНКО<sup>4</sup><sup>1</sup>*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України, Україна*<sup>2</sup>*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, Україна*<sup>3</sup>*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна*<sup>4</sup>*Національний транспортний університет, Київ, Україна*

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЮ ОБРОБКОЮ

*Найбільш перспективним методом підвищення зносостійкості малоресурсних деталей машин і механізмів є формування на їх робочих поверхнях зносостійких шарів найбільш доступних і низьковартісних для покриттів матеріалів у поєднанні з технологіями нанесення покриттів та їх подальшої обробки. У статті запропоновано спосіб створення поверхонь деталей із зносостійкими покриттями, що поєднує газополуменеве та (або) електродугове напилення сталей феритного та мартенситного класів і подальшу їх електроконтактну обробку. При створенні покриттів пропонується використання підходу, в основі якого лежить створення та цілеспрямоване кероване використання деформаційних структурно-фазових перетворень та метастабільних станів при нанесенні газотермічних покриттів та їх обробці, що забезпечують підвищення мікротвердості, зносостійкості, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.*

**Ключові слова:** зносостійкі покриття, електроконтактна обробка, газополуменеве та електродугове напилення, сталі мартенситного та феритного класів, деформаційні структурно-фазові перетворення, термодформаційний вплив

**Стан та актуальність проблеми.** Найбільш перспективним методом підвищення терміну служби малоресурсних деталей машин і механізмів є формування на їх робочих поверхнях зносостійких шарів із найбільш доступних і низьковартісних для покриттів матеріалів у поєднанні з технологіями нанесення покриттів та їх подальшої обробки.

На підставі аналізу існуючих методів нанесення покриттів для підвищення терміну служби деталей було обрано методи газополуменевого (ГПН) та електродугового (ЕДН) напилення (табл. 1) [1-3]. Це пов'язано з тим, що ці методи легко реалізуються, є дешевими і простими, мають технологічну гнучкість застосування до різних типорозмірів деталей. Їхня ефективність визначається: продуктивністю від 1 до 100 кг/год; товщиною покриттів від сотих часток міліметра до кількох міліметрів; відсутністю деформації виробів при нанесенні покриття (температура нагрівання виробу при напиленні не перевищує 150 ... 200°C); простотою та мобільністю обладнання; можливістю нанесення покриттів на локальні ділянки та великі поверхні деталей. Покриттям, що отримані методами газополуменевого та електродугового напилення, властива наявність пористості. Пористі покриття легко допрацьовуються, зберігають мастило, задовольняють основним властивостям антифрикційності

(самозмашення, самопритирання) і тому працюють в умовах обмеженого змащення, покращують протизадирну стійкість пари терті. Обладнання для газополуменевого та електродугового напилення характеризується: невеликими габаритами; гнучкістю та мобільністю, що дозволяє проводити нанесення покриттів у будь-якому просторовому положенні та в польових умовах; простотою обслуговування (не вимагає високої кваліфікації оператора) [1-3]. Загальним для цих методів є нагрівання матеріалу, що розпилюється до високопластичного стану або плавлення, прискорення частинок або крапель газовим потоком і подальша взаємодія частинок з поверхнею, що зміцнюється (відновлюється). Відрізняються газотермічні методи видом нагріву матеріалу, що напилюється, і способом прискорення частинок [1-3].

При газополуменевому напиленні (ГПН) джерелом теплової енергії є газове полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші кисень (повітря, що стискається) - горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природний газ та ін.). Метод газополуменевого напилення знаходить застосування: для формування антифрикційних покриттів на поверхнях, що сполучаються; захисту від зносу робочих органів сільськогосподарських машин (лемеша та долота плугів, лапи сівалок та культиваторів, ножі та протирижучі пластини кормозбиральних комбайнів); при відновленні зношених та зміцненні нових деталей транспортних засобів; нанесення антикорозійних покриттів [1-3].

У світовій практиці зміцнення, відновлення та антикорозійного захисту деталей електродугове напилення (ЕДН) [1-3] набуло значного поширення як один із найбільш технологічних та продуктивних методів (табл. 1).

Таблиця 1

### Характеристики газополуменевого та електродугового напилення

Параметр	Способи газотермічного напилення	
	Електродугове	Газополуменеве
Продуктивність, кг/год	3 ... 31	1 ... 10
Коефіцієнт використання матеріалу	0,8 ... 0,9	0,8 ... 0,95
Температура нагріву деталі, °С	100 ... 150	100 ... 150
Міцність зчеплення, МПа	До 40	До 50
Пористість, %	10,0 ... 30,0	16,0 ... 35,0

Сутність процесу електродугового напилення полягає в нагріванні (до плавлення) електричною дугою дротів, що сходяться, та розпаленні розплавленого металу повітрям, що стискається, або газовим потоком. Методом електродугового напилення можна відновлювати деталі, забезпечуючи їх зносостійкість на рівні нових деталей, та наносити покриття, які за якістю не поступаються покриттям, нанесеним плазмовим і детонаційним методами. Це зумовлено багатьма перевагами методу:

- високою тепловою ефективністю, яка досягає 57% порівняно з 17% при плазмовому напиленні;
- поширеністю та доступністю джерела енергії;

- відсутністю значного термічного впливу на деталь, деформація якої неминуча при наплавленні;

- низькою собівартістю відновлення деталей (питома собівартість нанесення покриття в 1,4-1,8 рази нижче, ніж при наплавленні); \

- перевагою перед наплавленням по трудомісткості (тривалість наплавлення 1 год 10 хв, тривалість ЕДМ - 24 хв.).

Властивості ЕДН - покриттів: зносостійкість у 1,5-1,8 рази вище загартованої сталі 45; стабільність втомної міцності; здатність працювати тривалий час без доступу олива до моменту схоплювання. Електродугове напилення використовується для антикорозійного захисту металоконструкцій, захисно-декоративних цілей, створення антифрикційних покриттів, відновлення деталей циліндричної та плоскої форми, які працюють в умовах тертя ковзання та змащення. Методом електродугове напилення наносять покриття:

1) з підвищеною зносостійкістю та міцністю зчеплення на поверхні деталей, що працюють при ударному навантаженні, в умовах знакозмінних та високих контактних навантажень;

2) на великогабаритні, тонкостінні та довгомірні деталі, на яких неможливе оплавлення покриття через їх велику масу або короблення в процесі оплавлення [1-3].

Однак, електродугові та газополумєневими покриття зі сталей мають твердість в межах 35 ... 50 HRC через вигоряння вуглецю в процесі напилення, що суттєво знижує їх зносостійкість. Тому розробка ефективних способів виготовлення деталей із газополумєневими та електродуговими покриттями підвищеної зносостійкості – актуальне завдання.

Незважаючи на велику кількість розробок у галузі підвищення твердості та зносостійкості газополумєневих та електродугових покриттів, в даний час дослідження набули спрямованості на активування процесів напилення та (або) їх модифікування (рис. 1) [3].

Реалізуються такі прийоми активації процесу напилення:

- інтенсифікація процесу змішування робочих газів;
- повідомлення додаткової енергії частинкам напилюваного матеріалу шляхом їх нагрівання та прискорення або того й іншого одночасно;
- повідомлення додаткової енергії зміцнюємій (відновлюємій) поверхні шляхом її попереднього нагрівання;
- зменшення середнього розміру частинок, що розпилюються;
- підвищення активності поверхні частинок зміцнюємій (відновлюємій) поверхні механічним (підвищення шорсткості) або хімічним (відновлення оксидів) шляхом;
- нанесення покриттів при зовнішньому впливі (ультразвукові коливання, електромагнітне поле, тощо); подальша термообробка покриття.

Методи активування процесу газополумєневого напилення, такі як борування, карбонітрування та ін. дозволили розробити технології та обладнання для нанесення високощільних зносостійких шарів, покриттів із матеріалів з низькою теплопровідністю, покриттів із легкоплавких полімерів, що послужило основою для впровадження технологічних процесів відновлення - зміцнення деталей в виробництво [3]. Процес активованого електродугового напилення характеризується зниженням середнього розміру частинок в 4 -7 разів, а коефіцієнт використання матеріалу досягає 0,85 [3].

Поєднання нанесення покриттів з модифікацією поверхні дозволяє створити комбіновані методи інженерії поверхні (інтегровані технології), перевагами яких є високий рівень фізико-механічних властивостей та можливість модифікування робочої поверхні [3]. Як показує вітчизняний та зарубіжний досвід, відновлення та зміцнення деталей найефективніше шляхом нанесення на робочі поверхні захисних покриттів інтегрованими технологіями. Модифікування поверхні деталей можливо проводити як зміною структури поверхневих шарів, так і зміною хімічного складу. До методів модифікування відносять різні способи нанесення покриттів і хіміко-термічну обробку або їх комбінації. Підвищують зносостійкість та міцнісні властивості електродугових і газополумєневих покриттів лазерною, ультразвуковою та ін. методами обробки (рис. 1).



Рис. 1. Основні напрямки підвищення зносостійкості газополумєневих і електродугових покриттів

Завдяки лазерній обробці (ЛО) електродугові покриття отримують дрібнокристалічну безпористу структуру з рівномірним розподілом хімічних елементів. Цим суттєво підвищується зносостійкість в умовах граничного тертя та абразивного зношування. Лазерна обробка напилених покриттів підвищує їхню стійкість до високотемпературної корозії, мікротвердість в 2 -10 рази, зносостійкість в 1,3-1,8 рази. Оплавлення газотермічних покриттів здійснюють

струмами високої частоти, високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем (рис. 1).

Суттєвий ефект підвищення мікротвердості та зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка (ЕПО) напилених покриттів (рис. 1). Аналіз структури показав, що після електронно-променевої обробки середній розмір зерен у покритті зменшується від сотень мікрометрів до сотень нанометрів, а мікротвердість та зносостійкість збільшуються в 5 разів при одночасному підвищенні на 60-80% межі витривалості та в 2,5-3,5 рази міцності зчеплення.

Ефективним є застосування хіміко-термічної обробки (ХТО) після напилення (рис. 1). Після борування зносостійкість напилених покриттів зі сталі Св-08 при сухому терті підвищилася у 100 разів. Іонне азотування (ІА) газополуменевих і електродугових покриттів із сталей 40Х13 та Х18Н10Т забезпечує мікротвердість в поверхневому шарі від 6,5 до 15 ГПа. При цьому зносостійкість збільшується в 8 раз.

Засобами для досягнення необхідної структури та властивостей газополуменевих і електродугових покриттів є різні види термічної обробки (ТО), пластичне деформування (ППД), в тому числі ультразвукова обробка (УЗО) та ін. У самому покритті значно подрібнюються всі структурні складові. Це забезпечує підвищення тріщиностійкості покриттів за збереження рівня зносостійкості. Обробка ультразвуком напилених покриттів забезпечує отримання шару зі щільністю, близькою до 100% від компактного матеріалу, що особливо важливо для зносостійких покриттів.

Застосування розглянутих вище методів збільшення міцності та зносостійкості газотермічних (ГТН) покриттів обмежена через низку недоліків [2, 3]. Зокрема, лазерна та електронно-променева обробка призводять до неоднорідної макроструктури поверхні. Хіміко-термічна обробка характеризується великою тривалістю процесу та не дозволяє проводити обробку великогабаритних виробів. При обробці необхідно прагнути до використання способів з мінімально необхідним нагріванням (високі температури негативно позначаються на «об'ємних» властивостях деталей, що зміцнюються) та малими величинами припусків на фінішну обробку. Технології, що поєднують методи формування покриттів та подальше їх модифікування дозволяють підвищити твердість та зносостійкість як газополуменевих, так і електродугових покриттів.

Високу зносостійкість, твердість та інші властивості електродугових і газополуменевих покриттів можна забезпечувати такими методами модифікування як електроконтактна обробка [3-5]. Структура покриття залежить від температурно-силових властивостей процесу електроконтактної обробки [3]. Електроконтактна обробка забезпечує зміцнюючий ефект при збереженні вихідних «об'ємних» механічних властивостей деталей та дозволяє:

- замінити високолеговані дефіцитні матеріали для покриттів дешевими;
- знизити вимоги до механічних властивостей матеріалу, що напилюється;
- замінити фінішну механічну обробку на поверхнево-пластичне деформування (ППД) до необхідних розмірів деталі та чистоти поверхні;
- замінити традиційну наплавку з її тріщинами та необхідністю фінішної механічної обробки при забезпеченні товщин покриттів  $h > 3$  мм з високою міцністю адгезійної і низьким рівнем залишкових напружень [3-5].

Електроконтактна обробка здійснюється під тиском під час прямого пропускання електричного струму (рис. 2).

Переваги електроконтактної обробки: висока продуктивність; низька енергоємність; відсутність світлового випромінювання та газовиділення; виключена необхідність у захисних середовищах; мінімальні тепловкладення.

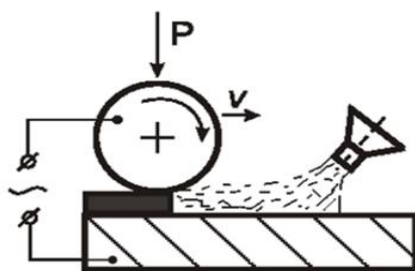


Рис. 2. Схема електроконтактної обробки напильних покриттів

Зона термічного впливу (ЗТВ) струму на деталь становить 0,2-1,0 мм внаслідок малої тривалості нагрівання. Відсутність рідкої фази в зоні нанесення покриття підвищує довговічність електрода, знижує втрати матеріалу покриття, дозволяє збільшити товщину зносостійкого шару в 3...6 разів при мінімальному рівні залишкових напружень та міцності зчеплення понад 200 МПа. Пористість покриттів не перевищує 5%. Висока якість покриттів при електроконтактній обробці забезпечується імпульсним характером процесу. Імпульсні методи характеризуються великими енергетичними можливостями та економічністю [3]. Електроконтактна обробка дозволяє здійснювати фінішну обробку напильних покриттів до необхідного розміру та чистоти поверхні без припусків або при значному їх зменшенні. Використання комбінації газополуменевого або електродугового напильня та наступної електроконтактної обробки відкриває широкі можливості в створенні зносостійких покриттів [3].

При проектуванні комбінованої технології створення покриттів напильням і електроконтактною обробкою доцільно використовувати підхід, в основі якого лежить створення та цілеспрямоване кероване використання деформаційних структурно-фазових перетворень та метастабільних станів, що забезпечують комплексне покращення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриттів. Головною особливістю цього підходу є здатність матеріалів покриттів до певних фазових перетворень та структурних змін при їх нанесенні та зміцнювальній обробці [6-8].

В якості матеріалів для зносостійких покриттів було запропоновано використовувати найбільш доступні та низьковартісні сталі мартенситного та феритного класів (табл. 2), головною особливістю яких є здатність до структурно-фазових перетворень при термодформаційному впливі.

При термодформаційному впливі в цих сталях відбувається аустенітно-мартенситне перетворення, яке впливає на твердість, опір деформації та зносостійкість напильних покриттів. Процес перетворення аустеніту на мартенситу деформації, та супутні цьому явища, поглинають велику кількість енергії. Зростання здатності металу до поглинання енергії призводить до підвищення опору зношуванню. Мартенсит, що виникає при деформації аустеніту, під дією прикладених ззовні напружень має підвищену міцність. Інтенсивність зміцнення пропорційна кількості мартенситу деформації, що

залежить від ступеня пластичної деформації в контактї та температури, за якої відбувається деформування. У мартенситї деформації утворюються сегрегації вуглецю такого самого типу, як і при старінні, що повинно призводити до додаткового зміцнення.

Таблиця 2

**Дротові сталі мартенситного (40X13) та феритного (Св-08) класів**

Марка матеріалу	Концентрація елементів, мас. %							Твердість після напilenня, HV
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe	
40X13	0,42	13,4	0,54	0,13	0,44	0,27	основа	360...420
Св08	0,06	0,1	–	–	0,40	0,25	основа	250...300

Внаслідок пластичної деформації сталі, при температурах мартенситного перетворення, кількість мартенситу збільшується. Утворення того чи іншого структурного типу мартенситу обумовлено температурою його формування, що залежить від складу сплаву та інших факторів. Мартенситну структуру одержують при швидкому охолодженні системи Fe-Cr, що знаходиться в області аустенітного або аустенітно-феритного стану.

В результаті аустенітно-мартенситного перетворення в структурі сталі, поряд з мартенситом, є і залишковий аустеніт. При термодформаційному впливі пластично деформований аустеніт знаходиться в метастабільному стані та характеризується зміною багатьох його параметрів: збільшенням опору деформації, структурними перетвореннями, спотворенням кристалічних ґрат і т.п. Тому максимальна зносостійкість досягається в випадках, коли в структурі сплавів міститься метастабільний аустеніт, здатний до деформаційних перетворень. Значна зносостійкість сплавів, у структурі яких міститься метастабільний аустеніт, пояснюється його високою здатністю до наклепу, легування, особливостями будови кристалічної решітки, в якій утруднено злиття лінійних дислокацій в порожнинні з утворенням зародкових тріщин, які представляють початкову стадію руйнування.

Таким чином, у статті пропонується вирішити проблему підвищення зносостійкості напилених покриттів шляхом активування процесів газополуменевого та (або) електродугового напilenня сталей феритного та мартенситного класів та їх подальше модифікування за допомогою електроконтактної обробки з використанням підходу, в основі якого лежить створення та цілеспрямоване керування фазових перетворень та метастабільних станів, що забезпечують комплексне поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриттів, а відтак і робочих поверхонь деталей.

**Мета досліджень** - встановлення впливу електроконтактної обробки на структурно-фазові перетворення в покриттях, отриманих газополуменевим та електродуговим напилуванням сталей мартенситного та феритного класів, у взаємозв'язку з фізико-механічними властивостями для підвищення їхньої зносостійкості.

**Результати досліджень.** В результаті проведених досліджень розроблено схему та спосіб створення зносостійких сталевих покриттів, що включають: газополуменеве та (або) електродугове напilenня покриттів і їх

електроконтактну обробку. Результати дослідження показали, що режими електроконтактної обробки покриттів зі сталей мартенситного та феритного класів значно відрізняються. Покриття, отримані газополуменевим та (або) електродуговим напиленням сталей феритного класу (Св-08) допускають більш жорсткі режими електроконтактної обробки. Покриття, отримані газополуменевим та (або) електродуговим напиленням сталей мартенситного класу (40X13) вимагають більш «м'яких» режимів електроконтактної обробки. При розробці способу використовували підхід, в основі якого лежать структурно-фазові перетворення при електродуговому та (або) газополуменевому напиленні та при електроконтактній обробці напилених покриттів, які забезпечують підвищення їх зносостійкості. В результаті досліджень встановлено взаємозв'язок фізико-механічних властивостей сталевих покриттів з структурно-фазовими перетвореннями в них. Показано, що електроконтактна обробка сталевих покриттів знижує їх пористість, збільшує вміст оксидів у поверхневому шарі, зменшує концентрацію залишкового аустеніту (внаслідок розігріву поверхні до 1200 С) в результаті  $\gamma \rightarrow \alpha$  - перетворень та дозволяє здійснювати модифікування. Достовірність отриманих результатів була підтверджена результатами досліджень фазового складу покриттів. Фазовий склад газополуменевих і електродугових покриттів із дротяних сталей 40X13 та Св-08 у вихідному стані та після їх електроконтактної обробки представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Фазовий склад покриттів із дротяної сталі Св-08 і 40X13

Матеріал покриття	Метод нанесення покриття	Фазовий склад	
		Вихідний	+ ЕКО
Св-08	ЕДН	$\alpha$ -Fe; FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ -Fe; FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Св-08	ГПН	A-Fe; FeO	-
40X13	ЕДН	$\alpha$ -Fe; FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe	$\alpha$ -Fe; FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; $\gamma$ -Fe
40X13	ГПН	A-Fe; $\gamma$ -Fe; FeO; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-

Для дослідження фазових і структурних перетворень у напилених шарах при електроконтактній обробці використовувався рентгеноструктурний аналіз (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизоване СоК $\alpha$  випромінювання, V = 30 кВ, I = 10 мА).

З фазовими перетвореннями, які у шарі при напиленні пов'язаний характер розподілу мікротвердості по глибині покриття. При цьому необхідно мати на увазі, що перші порції крапель розплавленої сталі 40X13, що напилюються, падають на холодну поверхню зміцнюємої (відновлюємої) поверхні та швидко охолоджуються, що призводить до реалізації в них мартенситного перетворення. Напилення наступних порцій розплавлених крапель сталі 40X13 супроводжується повторним розігрівом раніше закристалізованого покриття та протіканням у ньому процесів самовідпуску, що призводить до зниження твердості прилеглого до поверхні напиленого шару. У той же час у самому свіжонапиленому шарі покриття внаслідок уповільненої швидкості його охолодження на розігрітій до 250...300<sup>0</sup>С раніше закристалізованої поверхні зберігається підвищена кількість залишкового аустеніту [6-8]. При цьому



стабілізація залишкового аустеніту в поверхневих шарах покриття пов'язана з його ізотермічною витримкою в області підвищеної стійкості аустеніту при охолодженні [6-8].

На підставі проведених досліджень розроблено практичні рекомендації для створення зносостійких газотермічних покриттів із сталей мартенситного та феритного класів.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень отримано такі результати:

- запропоновано новий підхід до отримання газотермічних сталевих покриттів на низьколегованих сталях з підвищеною зносостійкістю, в основі якого лежить створення та цілеспрямоване кероване використання деформаційних структурно-фазових  $\gamma \rightarrow \alpha$  - перетворень та метастабільних станів шляхом температурно-силового впливу при їх електроконтактній обробці;

- представлена схема та спосіб конструювання сталевих покриттів, які включають газотермічне нанесення металевого підшару для забезпечення адгезії, нанесення сталевого зносостійкого покриття методом газополуменевого та (або) електродугового напилення з наступною електроконтактною обробкою;

- встановлений взаємозв'язок фізико-механічних властивостей сталевих покриттів із структурно-фазовими  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетвореннями в них і показано, що рівень цих властивостей, контрольований ступенем насичення мартенситної  $\alpha$ -фази вуглецем, збільшується зі збільшенням вмісту вуглецю та карбідних включень у сталях.

#### Список літератури

1. С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, С.О. Лузан. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій. Харків, ХНТУСГ. 2020. 127 с.

2. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.Н. Інженерія поверхні. Київ, Наукова думка. 2007. 559 с.

3. Лопата О.В. Забезпечення механічних властивостей поверхонь деталей із газотермічними покриттями електроконтактною обробкою. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

4. Корж В.Н., Ворона Т.В., Лопата А.В. Комбіновані методи інженерії поверхні. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матер. 4-ї міжун. наук.-практ. конф., 19-21 травня 2014, Чернігів: ЧНТУ, 2014. С. 159-163.

5. О.В. Лопата, І.В. Смирнов, «Перспективи комбінованих технологій формування функціональних покриттів», Інженерія поверхні, комплексний підхід: Матеріали VI Всеукраїнської наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наук. співробітників (11 грудня 2018, КПІ, 3Ф, Київ), Київ (2018), С. 15-18.

6. Черновол М.И., Ворона Т.В., Лопата Л.А., Капишон Л.С. Получение износостойких напыленных покрытий Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 14-й междуна. научно-техн. конференции (2-6 июня 2014 г., Свалява). Киев, АТМ Украины. С. 149-151.

7. М. И. Черновол, Т.В. Ворона, Е.Е. Л.А. Лопата Повышение износостойкости газотермических покрытий из железо-углеродистых сплавов электроконтактной обработкой Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузове машинобудування, автоматизація». Кіровоград, КНТУ. Випуск 28. 2015. С. 230-236.

8. М.И. Черновол, Т.В. Ворона, О.А. Микосянчик, Л.А. Лопата Структурно-фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и

---

последующей электроконтактной обработки Науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування Київ, НАУ, 2015. № 2(67). С. 99-109.

Стаття надійшла до редакції 05.08.2024

**Лопата Олександр Віталійович** – кандидат техн. наук, старший науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренко Національної академії наук України, вулиця Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014. E-mail: [lopata-sasha@ukr.net](mailto:lopata-sasha@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

**Лопата Віталій Миколайович** – канд. техн. наук, науковий співробітник, Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Казимира Малевича, 11, м. Київ, Україна, 03650, тел.: +38 044 287 55 29, E-mail: [gazoterm@ukr.net](mailto:gazoterm@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1578-1298>.

**Солових Євген Костянтинівич** – д. т. н., професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, проспект Університетський 8, м. Кропивницький, 25006. Україна), тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: [ekskntu09@gmail.com](mailto:ekskntu09@gmail.com); [ORCID: 0000-0002-6561-0964](https://orcid.org/0000-0002-6561-0964).

**Посвятенко Наталія Іванівна** - кандидат техн. наук, доцент кафедри інженерії машин і транспортного будівництва Національного транспортного університету, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010. тел.: 050-915-04-72. E-mail: [natali1963@ukr.net](mailto:natali1963@ukr.net); <http://orcid.org/0000-0002-2217-4170>.

**Lopata Oleksandr Vitaliyovych** - PhD in Technical Sciences, senior researcher of the department of strength of materials and structural elements in thermoforce fields and gas flows, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Salovo-botanical Street, Kyiv, Ukraine, 01014, E-mail: [lopata-sasha@ukr.net](mailto:lopata-sasha@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

**Lopata Vitaly Mykolayovych** - candidate of technical sciences, associate professor of the department of protective coatings, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazimyra Malevich Street, Kyiv, 03150. тел.: +38 044 287 55 29; E-mail: [gazoterm@ukr.net](mailto:gazoterm@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1578-1298>.

**Solovykh Yevhen Kostyantynovych** – doctor of technical sciences, Professor of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National University. (Кропивуцький, авен. University 8, 25006, Ukraine), тел.: +38 0522 390 4 33; E-mail: [ekskntu09@gmail.com](mailto:ekskntu09@gmail.com); [ORCID: 0000-0002-6561-0964](https://orcid.org/0000-0002-6561-0964).

**Posviatenko Nataliia Ivanivna** - PhD, Associate Professor of the Department of Engineering of Transport Construction Machines National Transport University Omelianovicha-Pavlenka st., 1, Kyiv, Ukraine, 01010. тел.: 050-915-04-72. E-mail: [natali1963@ukr.net](mailto:natali1963@ukr.net); <http://orcid.org/0000-0002-2217-4170>.

O. V. LOPATA, V. M. LOPATA, Ye. K. SOLOVYKH, N. I. POSVIATENKO

### INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF STEEL GAS-THERMAL COATINGS BY ELECTROCONTACT TREATMENT

The most promising method of increasing the wear resistance of low-resource parts of machines and mechanisms is the formation of wear-resistant layers on their working surfaces from the most accessible and low-cost materials for coatings in combination with technologies for applying coatings and their subsequent processing. The article proposes a method for creating parts with wear-resistant coatings, combining flame and (or) electric arc spraying of steels of ferritic and martensitic classes and their subsequent electrical contact processing. When creating coatings, it is proposed to use an approach based on the creation and targeted controlled use of deformation-induced structural-phase transformations and metastable states during the application of gas-thermal coatings and their processing, which ensure an increase in microhardness, wear resistance, physical-mechanical and operational properties. A new approach to obtaining gas-thermal steel coatings on low-alloy steels with increased wear resistance is proposed, which is based on the creation and purposeful controlled use of deformation structural-phase  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformations and metastable states by means of temperature-force influence during their electrical contact processing; The relationship between the physico-mechanical properties of steel coatings and structural-phase  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformations in them is established, and it is shown that the level of these properties, controlled by the degree of saturation of the martensitic  $\alpha$ -phase with carbon, increases with an increase in the content of carbon and carbide inclusions in steels.

**Key words:** wear-resistant coatings, electrical contact treatment, flame and electric arc spraying, martensitic and ferritic steels, deformation structural-phase transformations, thermal deformation effects

#### References

1. S.O. Luzan, O.I. Sidashenko, S.O. Luzan. Obgruntuvannya ta vdoskonalennya tehnologij vidnovlennya detalej. Kurs lekcij. Harkiv, HNTUSG. 2020. 127 s.
2. Yushenko K.A., Borisov Yu.S., Kuznecov V.D., Korzh V.N. Inzheneriya poverhni. Kiyiv, Naukova dumka. 2007. 559 s.
3. Korzh V.N., Vorona T.V., Lopata A.V. Kombinirovannye metody inzhenerii poverhnosti Kompleksne zabezpechennya yakosti tehnologichnih procesiv ta sistem: Mater. 4-y mezhdun. nauk. -prakt. konf., 19-21 travnya 2014, Chernigiv: ChNTU, 2014. S. 159-163.
4. O.V. Lopata, I.V. Smirnov, Perspektivi kombinovanih tehnologij formuvannya funkcionalnih pokryttiv, Inzheneriya poverhni, kompleksnij pidhid: Materiali VI Vseukrayinskoyi nauk.-tehn. konf. studentiv, aspirantiv ta nauk. spivrobotnikov (11 grudnya 2018, KPI, ZF, Kiyiv), Kiyiv (2018), S. 15-18.
5. Lopata A.V. Ensuring the mechanical properties of the surfaces of parts with gas-thermal coatings by electrical contact treatment. Thesis for the scientific degree of the doctor of philosophy, the field of study 13 – Mechanical engineering, program subject area 131 – Applied Mechanics. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.
6. Chernovol M.I., Vorona T.V., Lopata L.A., Kapishon L.S. Poluchenie iznosostojkikh napylenykh pokrytij Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij: Materialy 14-j mezhdun. nauchno-tehn. konferenci (2-6 iyunya 2014 g., Svalyava). Kiev, ATM Ukrainy. S. 149-151.
7. M. I. Chernovol, T.V. Vorona, E.E. L.A. Lopata Povyshenie iznosostojkosti gazotermicheskikh pokrytij iz zhelezo-uglerodistykh splavov elektrokontaktnoj obrabotkoj Zbirnik naukovih prac Kirovogradskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu «Tehnika v silskogospodarskomu virobniactvi, galuzove mashinobuduvannya, avtomatizaciya». Kirovograd, KNTU. Vipusk 28. 2015. S. 230-236.
8. M.I. Chernovol, T.V. Vorona, O.A. Mikosyanchik, L.A. Lopata Strukturno-fazovye prevrasheniya v gazotermicheskikh stalnykh pokrytyyah v processe ih napyleniya i posleduyushej elektrokontaktnoj obrabotki Naukovo-tehnicnij zhurnal Problema tertya ta znoshuvannya Kiyiv, NAU, 2015. № 2(67). S. 99-109.