

УДК 620.172.242

DOI: 10.18372/0370-2197.2(111).21362

Л.А. ЛОПАТА¹, В.М. ЛОПАТА², І.П. РИБАК², А.Є СОЛОВИХ³, С.Є. КАТЕРИНИЧ³¹Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка, Київ, Україна²Національний транспортний Університет, Київ, Україна³Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМБІНОВАНИХ ПОКРИТТІВ З ВУГЛЕРОДМІСНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

Із різноманіття варіантів поєднання первинних технологій створення покриттів впливає, що найбільше потребують підвищення властивостей наймасовіші технології покриттів, що застосовуються в машинобудуванні, насамперед – газотермічне напилення. Головні недоліки напилених покриттів – недостатня твердість і зносостійкість. Запропоновано підвищення триботехнічних властивостей напилених шляхом модифікування вуглеродовмісними наповнювачами з послідуною їх електроконтактною обробкою. Для дослідження особливостей структурних і фазових перетворень у поверхнях тертя напилених покриттів у присутності вуглецевмісних наповнювачів були проведені триботехнічні випробування. Встановлено, що електроконтактна обробка збільшує зносостійкість напилених покриттів зі сталі 40Х13 як з вуглецевими наповнювачами, так і без них. Зростання зносостійкості покриття з вуглецевмісними наповнювачами пов'язано як зі збільшенням його мікротвердості, так і з підвищенням вмістом у шарі залишкового аустеніту. Крім цього перетворення аустеніту на мартенсит також зміцнює поверхневі шари і призводить до появи в них стискаючих напруг, що перешкоджає руйнуванню при терті. Показано, що в результаті ЕКЗ покриття зі сталі 40Х13 істотно знижується інтенсивність зношування шару (в 3-4 рази) і децю зростає його коефіцієнт тертя. Насичення покриттів УДАГ сприяє збільшенню зносостійкості підданих електроконтактній обробці покриттів із сталі 40Х13 в 5 разів, і знижує коефіцієнт тертя трибосполучення. У ході триботехнічних випробувань визначено, що сталеві покриття із сталі 40Х13 з алмазовмісним наповнювачем мають досить високу зносостійкість в діапазоні питомих навантажень 50 - 90 МПа: інтенсивність зношування цих покриттів складала від 0,72 до 0,97 мкм/км.

Ключові слова: триботехнічні властивості, вуглеродовмісні наповнювачі, газотермічні покриття, електроконтактна обробка

Вступ. Характерною особливістю технологій поверхневого зміцнення є те, що не завжди є можливість отримати одночасно підвищення всіх властивостей деталі (зносостійкості, міцності, корозійної стійкості) для всіх режимів експлуатації. Матеріал покриття нанесений різними способами має різні експлуатаційні властивості.

Широкому впровадженню покриттів перешкоджає їхня недостатня зносостійкість, міцність і довговічність. Сьогодні думка про недостатню зносостійкість та міцності покриттів в екстремальних умовах експлуатації визнана як у вітчизняній, так і зарубіжній літературі [1, 2].

Із різноманіття варіантів поєднання первинних технологій створення покриттів впливає, що найбільше потребують підвищення властивостей наймасовіші технології покриттів, що застосовуються в машинобудуванні,

насамперед – газотермічне напилення. Головні недоліки напилених покриттів – недостатня твердість і зносостійкість [1, 2].

Суттєво підвищити твердість і зносостійкість можливо шляхом використання комбінованих технологій створення покриттів.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Для підвищення триботехнічних характеристик напилених покриттів використовують ультразвукову обробку, зокрема одночасно з плазмовим напиленням [1]. Ефективним є застосування хіміко-термічної обробки після напилення. Після борування зносостійкість напилених покриттів із сталі Св-08 при сухому терті підвищилася у 100 разів. Іонне азотування деталей із напиленими покриттями зі сталей 40X13 та X18H10T забезпечувало мікротвердість покриттів від 6,5 до 15 ГПа у поверхневому шарі товщиною від 5 до 40 мкм. Зносостійкість напилених покриттів зі сталей 40X13 та X18H10T збільшилася у 8 раз після іонного азотування [20].

Покрашують властивості газотермічних покриттів лазерною обробкою, електронно-променевим зміцненням, оплавленням та хіміко-термічною обробкою. Найбільш численними є дослідження лазерного зміцнення газотермічних покриттів [1]. Завдяки оптимізації параметрів лазерної обробки напилених покриттів отримують дрібнокристалічну безпористу структуру з рівномірним розподілом хімічних елементів. Цим суттєво підвищується зносостійкість газотермічних покриттів в умовах граничного тертя та абразивного зношування [1].

Лазерне оплавлення напилених покриттів збільшує мікротвердість у 10 разів, зносостійкість більш ніж у 2 раза [1].

Оплавлення газотермічних покриттів здійснюють струмами високої частоти, високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем, у вакуумних пічах [1]. Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості та зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка напилених покриттів [1].

Відзначають суттєве підвищення зносостійкості матеріалів, що модифікуються, поєднанням методів іонної, електронно-променевої та лазерної обробки [1]. В умовах дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей, що вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективними є комбіновані технології поверхневого зміцнення маловуглецевих сталей.

Застосування комбінованої технології газотермічного напилення та електроконтактної обробки та електроконтактного зміцнення має ряд переваг:

- знижуються вимоги до механічних властивостей та пористості напиленого шару. Напилення упри цьому виконує функцію допоміжної операції;
- можливо виключити фінішну механічну обробку напилених покриттів.

Мета роботи – дослідження триботехнічних властивостей напилених покриттів із вуглеродовмісними наповнювачами

Результати досліджень та їх аналіз. Для дослідження особливостей структурних і фазових перетворень у поверхнях тертя в присутності вуглецевмісних наповнювачів були проведені триботехнічні випробування.

Триботехнічні випробування проводилися в режимі тертя без мастила на автоматизованому трибометрі АТВП, що працює за схемою зворотно-поступального переміщення циліндричного зразка контртелом. Середня швидкість переміщення зразка щодо контртіла у процесі трибовипробувань

становила $\approx 0,1$ м/с. Випробовувалися зразки зі сталі Ст.3 з напиленими покриттями зі сталей 40X13 і Св-08: а) у вихідному стані; б) після електроконтактного зміцнення покриттів (ЕКЗ) без вуглецевмісних наповнювачів; в) після електроконтактної обробки (ЕКО) покриттів з вуглецевмісним наповнювачем УДАГ. Напилені зразки покриттів зі сталі 40X13 і Св-08 мали товщину від 0,25 до 0,35 мм. Твердість напилених покриттів із сталей 40X13 і Св-08 становила $HV=3000$ та 1750 МПа відповідно.

Номінальний контактний тиск випробувань становив 3 МПа. Як триботехнічні характеристики, що підлягають оцінці в процесі випробувань, були обрані величина зносу і коефіцієнт тертя. Перед випробуваннями робочі поверхні тіл, що контактують, знежирювалися спиртом і ацетоном і висушувалися. Вимірювання величини зношування зразків здійснювалося за втратою ваги при випробуваннях. З поверхні зразків перед зважуванням ретельно видалялися продукти зношування, потім промивали зразки, протиралися спиртом і просушувалися в сушильній шафі при температурі 1000°C . Після висушування зразки зважувалися на аналітичних терезах АДВ-200М. Зважування кожного зразка проводилося не менше 2-3 разів. Похибка вимірювання маси зразка становила 0,05 мг.

Для дослідження фазових та структурних перетворень у напилених шарах після ЕКО використовувався рентгеноструктурний аналіз (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизоване $\text{CoK}\alpha$ випромінювання: $V = 30$ кВ, $I = 10$ мА). Для фазового аналізу використовувалась стандартна картотека PDF. Встановлено, що в результаті трибзаємодії суттєво зростає мікротвердість поверхневого шару (в 1,5-1,8 рази) та збільшується ширина дифракційних ліній від матричної α -фази. Це вказує на підвищення щільності дислокацій у поверхневих шарах внаслідок їхньої інтенсивної пластичної деформації в процесі взаємодії. Фактично в процесі випробувань покриттів з алмазографітової шихтою УДАГ, у поверхневому шарі формується пориста субструктура, що характеризується розміром субзерен < 100 нм. Припущено, що ефективне подрібнення структури, що формується в поверхнях тертя при використанні вуглецевмісних наповнювачів, сприяє підвищенню триботехнічних властивостей.

Електроконтактна обробка напиленого покриття зі сталі 40X13 з УДАГ супроводжується істотним зростанням мікротвердості поверхневого шару до $H_{\mu} = 8400-8500$ МПа. Електроконтактна обробка покриття зі сталі Св-08 з УДАГ призводить до збільшення мікротвердості поверхневого шару до $H_{\mu} \approx 6000$ МПа. Глибина насичення поверхневого шару покриття вуглецевими наповнювачами у разі низьколегованої сталі Св-08 відносно невелика і не перевищує 50 мкм, а для сталі 40X13 глибина насичення в результаті ЕКЗ поширюється практично на весь напилений шар і становить $\approx 0,2-0,25$ мм.

Результати триботехнічних випробувань газотермічних покриттів (ГТН), що досліджуються, представлені на рисунках 1 - 3.

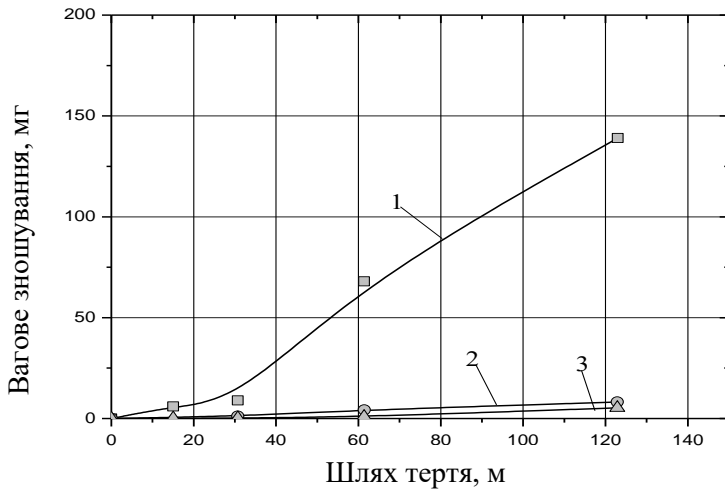


Рис. 1. Залежність вагового зносу від шляху тертя для зразків із покриттям зі сталі 40X13 (тертя без мастила, $p_a = 3$ МПа): 1 – напилене покриття зі сталі 40X13 (шліф.); 2 – напилене покриття після ЕКЗ; 3 – напилене покриття з наповнювачем УДАГ після

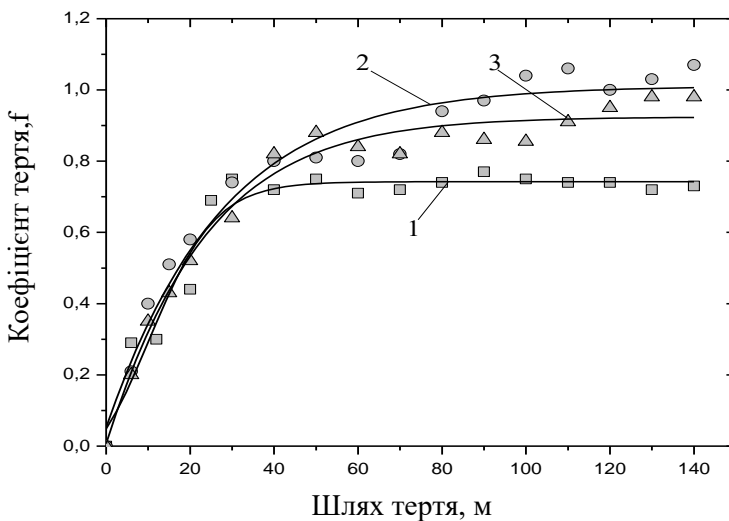


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя f від шляху тертя для зразків із покриття зі сталі 40X13 (тертя без мастила, $p_a = 3$ МПа): 1 – напилене покриття зі сталі 40X13 (шліф.); 2 – напилене покриття після ЕКЗ; 3 – напилене покриття з наповнювачем УДАГ після ЕКО

Таким чином, електроконтактна обробка збільшує зносостійкість напилених покриттів зі сталі 40X13 як з вуглецевими наповнювачами, так і без них. Зростання зносостійкості покриття з вуглецевмісними наповнювачами пов'язано як зі збільшенням його мікротвердості, так і з підвищеним вмістом у шарі залишкового аустеніту. При цьому необхідно мати на увазі, що присутність у шарі метастабільного аустеніту блокує зародження та поширення в ньому

мікротріщин, що формують частинки зношування. Крім цього перетворення аустеніту на мартенсит також зміцнює поверхневі шари [4, 5] і призводить до появи в них стискаючих напруг, що перешкоджає руйнуванню при терті.

Коефіцієнт тертя без мастила для покриттів після ЕКЗ зростає до значень $f = 0,9 \dots 1,0$. Високі значення коефіцієнта тертя свідчать про збільшення енергії активації процесу руйнування при терті для покриттів з вуглецевими наповнювачами в порівнянні з покриттями без них [6, 7]. Необхідно відзначити, що для покриття з УДАГ після ЕКО характерний дещо знижений рівень значень коефіцієнта тертя (рис. 3), що вказує на збереження в міцному шарі алмазографітових частинок.

Покриття з низьколеганованої сталі Св-08 мають значно нижчу зносостійкість (рис. 3). Так, зокрема, інтенсивність зношування напиленого покриття у вихідному (необробленому) стані становить $I_q = 7$ мг/м. Електроконтактна обробка покриття призводить до дворазового зниження вагового зносу на початкових стадіях випробувань (рис. 3). Після 50 метрів шляху тертя інтенсивність зношування покриття зі сталі Св-08 після ЕКО виходить на рівень, характерний для необробленого напиленого покриття. Про це можна судити з кута нахилу кривих 1 і 2 рисунку 3.

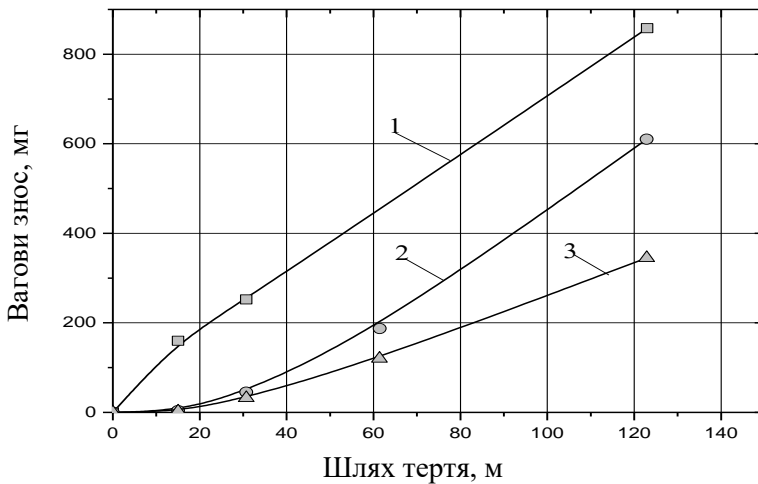


Рис. 3. Залежність вагового зносу від шляху тертя для зразків із покриттями зі сталі Св-08 (тертя без мастила, $p_a = 3$ МПа): 1 – напилене покриття зі сталі Св-08 (шліф.); 2 – напилене покриття після ЕКЗ; 3 – напилене покриття з УДАГ після ЕКО

Коефіцієнт тертя покриттів перебуває у межах $f = 0,6 \dots 0,7$ (рис. 4). Для покриття зі сталі Св-08 з УДАГ після його ЕКО характерний дещо вищий рівень зносостійкості (рис. 3, крива 3). Однак і в цьому випадку на пізніх стадіях випробувань вагове зношування шару помітно зростає.

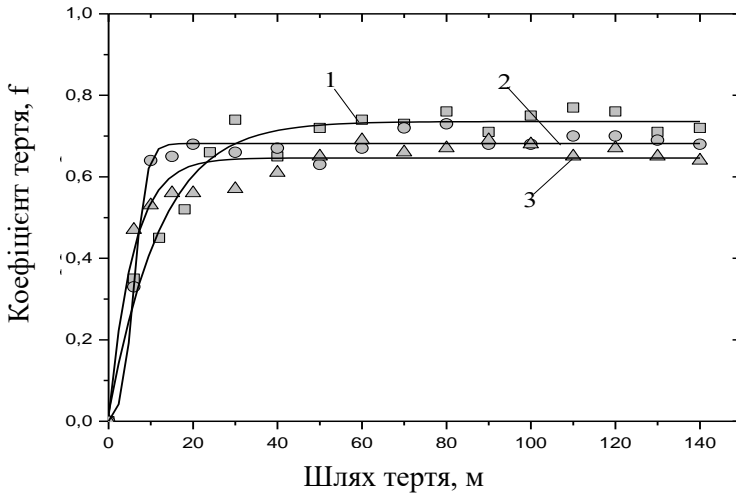


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя f від шляху тертя для зразків із покриттям зі сталі Св-08 (тертя без мастила, $p_a=3$ МПа): 1 - напилене покриття зі сталі Св-08 (шліф.); 2 – напилене покриття після ЕКЗ; 3 – напилене покриття з наповнювачем УДАГ після ЕКО

Таким чином, електроконтактна обробка покриття з низьколегованої дротяної сталі Св-08 призводить на ранніх стадіях випробувань до деякого збільшення зносостійкості шару (в 2 рази). Однак внаслідок малої товщини поверхнього шару покриття з вуглецевими наповнювачами у міру його стирання в процесі взаємодії інтенсивність зношування покриття виходить на рівень I_q для незміцненого шару.

Слід зазначити, що у випадку триботехнічних випробувань з вуглецевими наповнювачами можна очікувати істотно більш вираженого позитивного ефекту від електроконтактної обробки покриттів, отриманих напилюванням низьколегованої сталі Св-08. Таким чином, найбільш високу зміцнюючу дію має електроконтактна обробка мартенситної сталі 40X13.

На рисунку 5 наведено характерні мікроструктури поверхонь тертя для покриття зі сталі Св-08 та контртіла із загартованої сталі У8. Судячи з мікроструктури, у процесі тертя поверхні контртіла формуються характерні борозни і краплевидні виступи, але в поверхні покриття – борозни і вириви.

За даними [6, 7], зазначена морфологія поверхонь тертя пов'язана з тим, що, в процесі адгезійного схоплювання елементів пари тертя, в результаті перенесення матеріалу напиленого покриття на контртіло, на останньому формуються виступи (рис. 5.а), які проорюють глибокі борозни в газотермічному покритті (рис. 5.5.б).

Таким чином, показано, що в результаті ЕКЗ покриття зі сталі 40X13 істотно знижується інтенсивність зношування шару (в 3-4 рази) і дещо зростає його коефіцієнт тертя.

Насичення покриттів УДАГ сприяє збільшенню зносостійкості підданих електроконтактній обробці покриттів із сталі 40X13 в 5 разів, і знижує коефіцієнт тертя трибосполучення.

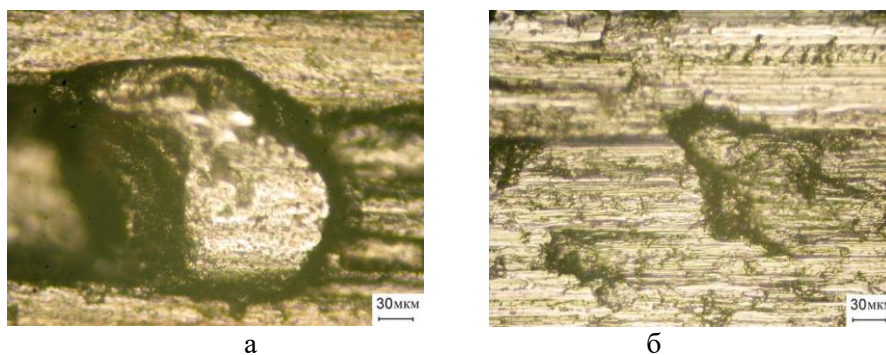


Рис. 5. Мікроструктура поверхні елементів пари тертя Св-08 - сталь У8: а - контроль (загартована сталь У8); б - ДПН покриття зі сталі Св-08 + ЕКО

Електроконтактне зміцнення покриття з низьколегованої сталі Св-08 призводить до дворазового зниження його вагового зносу на початкових стадіях випробувань. Порівняно нижча ефективність електроконтактного зміцнення покриття зі сталі Св-08 обумовлена відносно малою глибиною і низькою твердістю зміцненого шару. Найефективніше використання електроконтактного зміцнення для напилених покриттів із сталей мартенситного класу.

У ході триботехнічних випробувань встановлено, що сталеві покриття із стали 40Х13 з алмазовмісним наповнювачем мають досить високу зносостійкість в діапазоні питомих навантажень 50 - 90 МПа: інтенсивність зношування цих покриттів складала від 0,72 до 0,97 мкм/км.

Висновки

Одним з найбільш ефективних шляхів вирішення задачі підвищення терміну служби деталей трибосполучень є використання напилених покриттів з наповнювачами, що містять вуглець в поєднанні з електроконтактною обробкою. Вуглецевмісні наповнювачі будуть не тільки підвищувати зносостійкість деталей трибосполучень, але і виконувати роль твердого мастила.

Електроконтактна обробка збільшує зносостійкість напилених покриттів зі сталі 40Х13 як з вуглецевими наповнювачами, так і без них. Зростання зносостійкості покриття з вуглецевмісними наповнювачами пов'язано як зі збільшенням його мікротвердості, так і з підвищенням вмістом у шарі залишкового аустеніту. Порівняно нижча ефективність електроконтактного зміцнення покриття зі сталі Св-08 обумовлена відносно малою глибиною і низькою твердістю зміцненого шару. Найефективніше використання електроконтактного зміцнення для напилених покриттів із сталей мартенситного класу.

Список літератури

1. В.М. Корж, Т.В. Ворона, О.В. Лопата Комбіновані методи інженерії поверхні. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: Матер. 4-ї міждун. наук.-практ. конф. (19-21 травня 2014, ЧНТУ, Чернігів), Чернігів, ЧНТУ. 2014. С. 159-163.
2. М.І. Черновол, Т.В. Ворона, Л.А. Лопата, Л.С. Капішон Отримання зносостійких покриттів напилених. *Інжен. поверхн. та реновація виробів*: Матеріали 14-ї міжнародної науково-технічної конференції (2-6 июня 2014 г., Свалява). Киев, АТМ України. С. 149-151.
3. М.І. Черновол, Т.В. Ворона, О.О. Мікосянчик, Л.А. Лопата Спосіб отримання зносостійких покриттів. *Інженерія поверхні та реновація виробів*: Матеріали 15-ї

міжнародної науково-технічної конференції (1-4 июня 2015, Затока). Киев, АТМ України. С. 206-208.

4. М.І. Черновол, Т.В. Ворона, О.О. Мікосянчик, Л.А. Лопата. Структурно-фазові пертворення в газотермічних сталевих покриттях у процесі їх напилення і послідувочої електроконтактної обробки. *Проблема тертя та зношування*. Вип. 2(67). Київ, НАУ. 2015. С. 99-109.

5. М.А. Белоцерківський, Т.В. Ворона, М.С. Агеєв, В.М. Лопата, С.Л. Чиграй. Структурні особливості в сталелих газотермічних покриттях і можливості їх використання. *Сучасні проблеми підготовки виробництва та ремонту в промисловості та на транспорті*: Матеріали 16 го міжнар. науково-техн. Семінара (22-26 февраля 2016 г. Свалява). Киев, АТМ України. 2016. С. 12-16.

6. М.І. Черновол, Т.В. Ворона, В.В. Аулін. Дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів, модифікованих електроконтактною обробкою. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика*: Матеріали 15-ї міжнар. науково-практичної конференції (15-18 сентября 2015, Одесская область, Затока). Киев, АТМ України. 2015. С. 191-196.

7. М. І. Черновол, Т.В. Ворона, Л.А. Лопата. Підвищення зносостійкості газотермічних покриттів із залізо-вуглецевих сплавів електроконтактною обробкою. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Вип. 28. Кіровоград, КНТУ, 2015. С. 230-236.

Отримано: 21 травня 2026

Прийнято: 25 травня 2026

Опубліковано: 31 травня 2026

L. LOPATA, V. LOPATA, I. RYBAK, A. SOLOVYKH, S. KATERINICH

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMBINED COATINGS WITH CARBON-CONTAINING FILLERS INTEGRATED TECHNOLOGIES

From the variety of options for combining primary coating technologies, it follows that the most widespread coating technologies used in mechanical engineering, primarily gas-thermal spraying, are in greatest need of improving their properties. The main disadvantages of sprayed coatings are insufficient hardness and wear resistance. It is proposed to increase the tribotechnical properties of sprayed coatings by modifying them with carbon-containing fillers with their subsequent electrocontact treatment. Tribotechnical tests were conducted to study the features of structural and phase transformations in the friction surfaces of sprayed coatings in the presence of carbon-containing fillers. It was established that electrocontact treatment increases the wear resistance of sprayed coatings made of 40X13 steel both with and without carbon fillers. The increase in wear resistance of the coating with carbon-containing fillers is associated with both an increase in its microhardness and an increased content of residual austenite in the layer. In addition, the transformation of austenite into martensite also strengthens the surface layers and leads to the appearance of compressive stresses in them, which prevents fracture during friction. It is shown that as a result of the ECZ of the coating of steel 40X13, the intensity of wear of the layer is significantly reduced (by 3-4 times) and its friction coefficient increases slightly. Saturation of coatings with UDAG contributes to an increase in the wear resistance of coatings of steel 40X13 subjected to electrocontact treatment by 5 times, and reduces the friction coefficient of the tribocontact. During tribotechnical tests, it was determined that steel coatings made of 40X13 steel with diamond-containing filler have a fairly high wear resistance in the range of specific loads of 50 - 90 MPa: the wear intensity of these coatings was from 0.72 to 0.97 $\mu\text{m}/\text{km}$.

Keywords: tribotechnical properties, carbon-containing fillers, gas-thermal coatings, electrocontact processing

References

1. V.M. Korzh, T.V. Vorona, O.V. Lopata Kombinovani metody inzhenerii poverkhni. Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: Mater. 4-yi mezhdun. nauk.-prakt. konf. (19-21 travnia 2014, ChNTU, Chernihiv), Chernihiv, ChNTU. 2014. S. 159-163.
2. M.I. Chernovol, T.V. Vorona, L.A. Lopata, L.S. Kapishon Otrymannia znosostiikykh pokryttiv napylenykh. Inzhen. poverkhn. ta renovatsiia vyrobiv: Materialy 14-y mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (2-6 yunია 2014 h., Svaliava). Kyev, ATM Ukrainy. S. 149-151.
3. M.I. Chernovol, T.V. Vorona, O.O. Mikosianchyk, L.A. Lopata Sposib otrymannia znosostiikykh pokryttiv. Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv: Materyaly 15-i mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (1-4 yunია 2015, Zatoka). Kyev, ATM Ukrainy. S. 206-208.
4. M.I. Chernovol, T.V. Vorona, O.O. Mikosianchyk, L.A. Lopata. Strukturno-fazovi pertvorennia v hazotermichnykh stalevykh pokryttiakh u protsesi yikh napyleniia i posliduiuchoi elektrokontaktnoi obrobky. Problema tertia ta znoshuvannia. Vyp. 2(67). Kyiv, NAU. 2015. S. 99-109.
5. M.A. Belotserkivskyyi, T.V. Vorona, M.S. Ahieiev, V.M. Lopata, S.L. Chyhray Strukturni osoblyvosti v stalevykh hazotermichnykh pokryttiakh i mozhlyvosti yikh vykorystannia. Suchasni problemy pidhotovky vyrobnyctva ta remontu v promyslovosti ta na transporti: Materialy 16 ho mizhnar. naukovo-tekhn. Seminara (22-26 fevralia 2016 h. Svaliava). Kyev, ATM Ukrainy. 2016. S. 12-16.
6. M.I. Chernovol, T.V. Vorona, V.V. Aulin Doslidzhennia trybotekhnichnykh vlastyvostei hazotermichnykh pokryttiv, modyfikovanykh elektrokontaktnoiu obrobkoiu. Yakist,

standartyzatsiia, kontrol: teoriia ta praktyka: Materily 15–i mizhnar. naukovo–praktychnoi konferentsii (15-18 sentiabria 2015, Odessaika oblast, Zatoka). Kyev, ATM Ukrainy. 2015. S. 191-196.

7. M. I. Chernovol, T.V. Vorona, L.A. Lopata Pidvyshchennia znosostiikosti hazotermichnykh pokryttiv iz zalizo-vuhletseyvykh splaviv elektrokontaktoiu obrobkoiu. Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Vyp. 28. Kirovohrad, KNTU, 2015. S. 230-236.

Lopata Larisa - candidate of technical sciences, associate professor, 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: beryuza@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-2053-9252>

Vitaliy Lopata - candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department National Transport University, Omelianovycha-Pavlenka st., 1, Kyiv, Ukraine, 01010. Kyiv, Ukraine, тел. 097-214-78-31. E-mail: gazoterm@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-2071-5754>

Ілля Рибак – Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department National Transport University, Omelianovycha-Pavlenka st., 1, Kyiv, Ukraine, 01010. Kyiv, Ukraine, тел. 097-214-78-31. E-mail: ilya.0003@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-2071-5754>

Andrey Solovykh - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 9, University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: andreisolovuh@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5780-3582>

Stanislav Katerinich - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 9, University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: katerinichs@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-30520747>

Лопата Лариса Анатоліївна – канд. техн. наук, доцент, науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України, вул. Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014, те.: +380500602734. E-mail: beryuza@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Лопата Віталій Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства Національного транспортного університету, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010. тел. 097-214-78-31. E-mail: gazoterm@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-1578-1298>

Рибак Ілля Петрович - доктор філософії, доцент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства Національного транспортного університету, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010. тел. 097-214-78-31. E-mail: ilya.0003@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-2071-5754>

Солових Андрій Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральнoукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: andreisolovuh@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

Катеринич Станіслав Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральнoукраїнського національного університету, проспект. Університетський, 9, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: katerinichs@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>