

М.В. Бобер, д.т.н.**В.М. Волкогон, д.т.н.***Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН
України***В.С. Антонюк, д.т.н., проф.***Національний технічний університет України «КПІ»*

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ФРИКЦІЙНИХ ПАР СТВОРЕННЯМ ГРАДІЄНТНИХ СТРУКТУР МЕТАЛІЧНИХ СПЛАВІВ

Представлено результати досліджень впливу технологічних режимів процесу електроіскрової обробки металевих поверхонь на характер формування топографії та структуру поверхневого шару. Визначено параметри топографії зміцненої поверхні з градієнтною структурою на основі металічних сплавів отриманої під впливом імпульсного електричного розряду великої потужності. Запропоновано методологію зміцнення важконавантажених фрикційних пар, яка полягає у формуванні дією імпульсного електричного розряду визначеної топографії модифікованого поверхневого шару дискретного типу, з урахуванням його фізико-механічних характеристик.

Вступ. Основною причиною відмов та виходу з ладу деталей і механізмів, які працюють в умовах фрикційного контакту, є їх знос. У переважній більшості випадків стан робочих поверхонь механізмів і елементів контактуючих пар та умови експлуатації визначають їх довговічність, при цьому обов'язковою вимогою є тривале збереження функціональних властивостей поверхні. Повною мірою такий підхід стосується оцінки умов роботи важконавантажених фрикційних пар, тому пошук шляхів підвищення їх довговічності є актуальним завданням [1].

Одним з найбільш ефективних методів зміцнення поверхонь деталей є електрофізичний, зокрема електроіскрове легування поверхонь, яке забезпечує суттєве підвищення зносостійкості деталей. Позитивний ефект електроіскрових покриттів, насамперед, виявляється в зміні механізму зносу. Маючи більш високу твердість, порівняно з металом основи, покриття знижують адгезійний знос, одночасно знижуючи при цьому коефіцієнт тертя [2].

Слід зазначити вибірковість захисної дії покриттів, тобто здатність протистояти визначеним видам зносу – окисному, адгезійному та абразивному, – але стійкість їх в умовах зносу від втомлюваності та високих контактних навантажень недостатня. Крім того, навіть сам процес нанесення покриттів може призвести до зниження механічних властивостей основного матеріалу і передчасного руйнування через когезійне розтріскування або адгезійне відшарування в екстремальних умовах експлуатації. Численні спостереження пристосованості поверхневих шарів до умов експлуатації важконавантажених фрикційних пар показали, що при цьому виникають тонкі шари вторинних структур, що мають острівковий (дискретний) характер та підвищену зносостійкість [3].

В процесі електроіскрового легування під впливом термомеханічного впливу іскрового розряду відбувається ерозія матеріалу анода в рідкій, твердій та паровій фазах і перенос продуктів ерозії на катод, на поверхні якого в результаті мікрометалургійних процесів утворюється своєрідний композиційний матеріал [4]. До його складу входять матеріали обох електродів, продукти їхньої взаємодії один з одним та елементами міжелектродного середовища. Головне завдання при створенні електродних матеріалів полягає в тому, щоб збільшити, за можливістю, внесок рідкої фази в загальну ерозію, оскільки реакційна здатність рідин значно вища за тверду фазу. Крім того, продукти твердофазної ерозії погано закріплюються на поверхні катода, завдяки чому коефіцієнт переносу і товщина покриття виявляються низькими для крихких матеріалів [5].

Мета роботи: підвищення зносостійкості важконавантажених фрикційних пар шляхом формування визначеної топографії зміцненої поверхні з градієнтною структурою на основі металічних сплавів дією потужного імпульсного електричного розряду.

Методологія та методики досліджень. Дискретні композиційні покриття являють собою ділянки з підвищеними характеристиками, визначеною геометрією, які наносяться на робочу поверхню деталей пар тертя з визначеною суцільністю, і різною глибиною проникнення в робочу поверхню залежно від умов експлуатації контактуючих пар. Залежно від умов експлуатації, дискретні покриття дають можливість конструювати оптимальні зміцнені поверхні в широкому діапазоні умов навантаження і підвищувати довговічність пар, які працюють в умовах фрикційного контакту.

Незаперечними перевагами дискретного характеру покриттів перед іншими видами поверхневого зміцнення є:

- підвищена адгезійна і когезійна стійкість в процесі деформації основи і високих контактних тисків, які виникають в процесі взаємодії контактуючих пар;

- можливість конструювати поверхні, які працюють з мінімальним зносом в парах тертя, залежно від умов експлуатації (враховуючи вид зносу; зусилля, взаємодіючі в парах тертя, тиск, температури тощо).

Необхідна конструкція дискретного композиційного покриття може бути визначена за розрахунковим методом на базі моделі, яка описує напружено-деформований стан в покритті. Цей підхід покладено в основу моделювання технологічного формування покриття із заданою кількістю, розміром і просторовим розподілом включень в основу. Зокрема, вибір розміру дискретної ділянки обирають, виходячи з критичного шагу тріщини, який виникає внаслідок когезійного розтріскування покриття [6].

Традиційними способами нанесення покриттів складно реалізувати дискретну архітектуру при їх формуванні, тому одним із найбільш придатних для цієї мети є електрофізичний метод – застосування електричного розряду великої потужності при визначених швидкостях переміщення електрода відносно зміцнюваної поверхні.

Перевагами методу формування зміцнюючого покриття дією імпульсного електричного розряду є наступне:

– одиничний електричний розряд дає можливість забезпечити стабільність фізико-механічних властивостей окремих ділянок покриття, сформованого з використанням певного електрода;

– зміцнення поверхні за один прохід різко зменшує час обробки;

– зміна величини робочого струму дозволяє регулювати розмір та глибину одиничної ділянки (кратера) і ступінь проникнення матеріалу електрода в основу;

– змінюючи частоту імпульсів або швидкість переміщення електрода відносно зміцнюваної поверхні можна управляти топографією робочої поверхні.

Процес формування дискретного композиційного покриття полягає в наступному. Імпульс струму, що виробляється генератором, викликає пробій в місці контакту деталі й електрода. Під час зворотно-поступального руху електродів вздовж деталі генератор виробляє електричні імпульси постійної частоти, амплітуди і протяжності. Проходження електричного імпульсу через лінію контакту “деталь–електрод” призводить до виникнення каналу наскрізної провідності

[7].

Щільність потоку сягає $105\text{--}106 \text{ A/cm}^2$, а температура в каналі розряду – $(8\text{--}10)3 \text{ }^\circ\text{C}$. По каналу наскрізної провідності пучок електронів, відбитий від поверхні деталі, бомбардує поверхню електрода, внаслідок чого метал електрода локально розігрівається до $(4\text{--}5)103 \text{ }^\circ\text{C}$, частково плавиться й у вигляді крапель, дифузійних парів, а також за рахунок ударної хвилі проникає в поверхню деталі на задану глибину, при цьому покриття поверхні має вигляд мозаїки. Крім того, в результаті ударної хвилі на поверхню переносяться також частинки (крапельки) електрода.

Виходячи з цих обставин та враховуючи те, що зносостійкість поверхні, зміцненої дискретними покриттями залежить від їх суцільності, досліджено формування суцільності покриттів за одних і тих же технологічних умов процесу при застосуванні електродів із різних матеріалів – сталі 65Г, сталі Х18Н10Т та міді, що повинно забезпечувати оптимальний трибоконтакт фрикційної пари в процесі її експлуатації. Нанесення покриттів здійснювалося при величині електричного розряду потужністю 20 кВт з частотою подачі електричних імпульсів 100 Гц , для чого використовували однофазний генератор постійного струму. Швидкість переміщення електрода відносно зміцнюваної поверхні – $0,8 \text{ м/с}$. Ширина доріжки зміцнюючого покриття складала 10 мм для кожного матеріалу електрода. Після цього за допомогою інструментального мікроскопу, обладнаного вимірювальною сіткою, на плямі площею 1 см^2 визначали кількість кратерів, що виникли в результаті електричного розряду та їх розмір в поперечнику. Суцільність покриття складає співвідношення поверхні зайнятої кратерами від розряду та площі досліджуваного плями.

Структурні дослідження виконували на електронному мікроскопі “Jeol T-10”. Рентгеноструктурний фазовий аналіз здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 при напрузі $20\text{--}30 \text{ кВ}$ та анодному струмі $10\text{--}15 \text{ мА}$ в безперервному режимі. Розшифровку дифрактограм проводили, визначаючи фазовий склад локальної ділянки шляхом порівняння розрахункових значень отриманих міжплощинних відстаней з табличними.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз зміцнених ділянок здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 при напрузі $20\text{--}30 \text{ кВ}$ та анодному струмі $10\text{--}15 \text{ мА}$ в безперервному режимі.

Методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) поверхонь в характеристичному випроміненні проведені дослідження поверхонь зміцнених зразків.

Виміри зразків з різними видами дискретного функціонального покриття електродом зі сталі 65Г, сталі Х18Н10Т та міді проводили за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 1 Н за Вікерсом.

Результати досліджень. Процес зміцнення металевої поверхні можна звести до єдиного процесу взаємодії енергетичного потоку з матеріалом, що ініціює в ньому структурні зміни, пов'язані з підвищенням щільності дефектів кристалічної будови. Ступінь зміцнення та експлуатаційні властивості структур, що виникають, визначаються величиною поглиненої внутрішньої енергії та стабільністю структурно-енергетичних параметрів матеріалу в процесі експлуатації. При спільній дії енергетичного потоку та потоку активної речовини остання, вступаючи в фізико-хімічну взаємодію зі зміцнюваним матеріалом, додатково підвищує структурно-енергетичні параметри модифікованого матеріалу внесенням вільної енергії самою активною речовиною та поглинанням внутрішньої енергії за рахунок реакцій змішування і виникнення нових сполук.

Поглинання внутрішньої енергії чи підвищення вільної енергії в процесі трансформації вихідної структури в зміцнену є результатом кооперативних фізико-хімічних мікроструктурних процесів, активність яких адекватна дисбалансу між активаційними і дисипативними енергетичними потоками, які розвиваються в зміцнюваному матеріалі за рахунок зовнішньої зміцнюючої енергетичної дії. Повнота реалізації активаційних мікроструктурних процесів управляється щільністю енергетичного потоку зміцнюючої дії та реакції на неї матеріалу, а дисипативних – інтенсивністю енергомасопереносу в модифікованій структурі. Зміцнюючу дію можна оцінити двома узагальненими характеристиками: щільністю енергетичного потоку та часом активної взаємодії з вихідною структурою. Глибина зміцненого шару пропорційна часу активної взаємодії, тому технологія зміцнення, в якій використовуються енергетичні потоки великої щільності, сприяє формуванню зміцнених структур в більш тонких поверхневих шарах з високим градієнтом механічних властивостей, а підвищення щільності потужності зміцнюючої дії обумовлює зростання ступеня зміцнення. Звідси витікає, що збільшення величини електричного розряду призводить до визначеної зміни механічних характеристик поверхні та експлуатаційних її властивостей. При цьому суттєво може змінюватися топографія зміцнюваної поверхні.

Дослідження впливу технологічних режимів процесу електроіскрової обробки металевих поверхонь на характер формування їх топографії та структуру поверхневого шару сформованого при щільності потоку $I = 105\text{--}106 \text{ А/см}^2$ та температурі в каналі розряду Т

$= (8 \cdot 10)^3$ °C показали, що характеристики дискретного покриття, сформованого на сталі М76, загальний вигляд якого наведено на рисунку 1, значною мірою залежать від технологічних параметрів процесу.

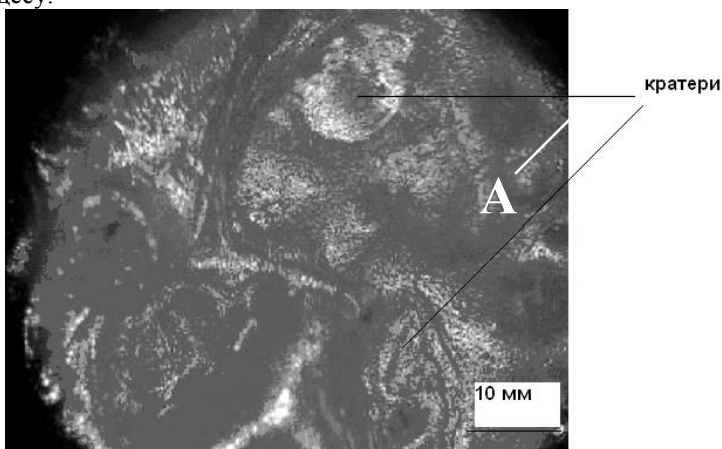


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні зразка після обробки потужним електричним розрядом

Аналіз результатів проведених досліджень з визначення впливу параметрів електричного розряду на топографію зміцнюваної поверхні дає підстави для висновку про те, що технологічні параметри процесу зміцнення імпульсним електричним розрядом безпосередньо впливають на характеристики отриманого покриття дискретного виду. Змінюючи технологічні параметри в ході процесу зміцнення, а саме – силу струму, напругу, швидкість переміщення деталі та частоту імпульсів, ми отримуємо різні значення характеристик дискретного покриття таких, як діаметр ділянки, глибина проникнення матеріалу електроду і суцільність дискретних ділянок

Зйомки шліфів зразків виконані на електронному мікроскопі “Jeol T-10”, показали, що покриття являє собою включення матеріалу електроду в основу на визначену глибину, яка залежала від швидкості переміщення, матеріалу електроду та величини струму.

В результаті дії електричного розряду має місце локальне оплавлення ділянки основи, яка складається із зони оплавлення і зони термічного впливу, що виникає внаслідок загартування. За даними аналізу мікроструктури шару оплавленої поверхні, елементи розплаву, що виникає під дією електричного розряду, рухається вихороподібно.

Встановлено, що в процесі електричного розряду на поверхні зміцнюваної деталі формуються ділянки вторинних структур α -заліза в поверхневому шарі деталі, обумовлених високими швидкостями нагрівання і охолодження плями зміцнюваної поверхні [8].

Електронно-мікроскопічні та металографічні дослідження поперечного розрізу поверхневого шару, сформованого дією імпульсного електричного розряду, показали наявність трьох зон – “білого шару” (рис. 2), що не піддається травленню і не виявляється за металографічним методом, під яким знаходиться безпористий шар товщиною 80 мкм, що складається з мартенситу та карбідів, під яким розміщується пластична перехідна зона товщиною 35–40 мкм (рис. 3), що виникає за рахунок протікання процесів взаємної дифузії матеріалу електрода. Її мікроструктуру представлено троститом з карбідною сіткою.

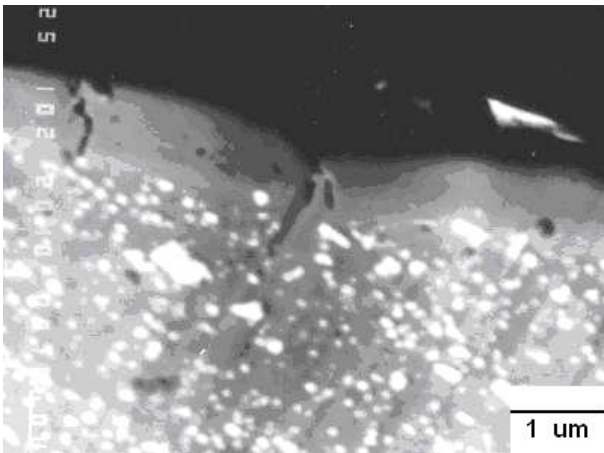


Рис. 2. РЕМ-зображення мікроструктури поверхні зразка, зміцненої дією електричного розряду; “білий шар”, що виникає на поверхні внаслідок дії електричного розряду

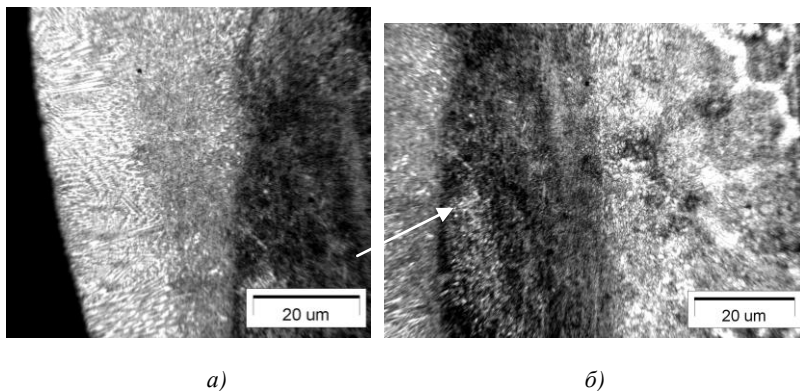


Рис. 3. Мікроструктури верхнього (а) і проміжного шару (б) поверхні зміцненого зразка

Мікроструктура матеріалу основи складається з фериту, перліту та цементитної сітки, що свідчить про те, що під дією електричного розряду формується мозаїчне покриття. Отримано результати градієнтного типу, топографія якого впливає на формування напружено-деформованого стану зміцнюваної поверхні і, як наслідок, на рівень механічних властивостей.

Зважаючи на те, що різнойменні електроди для формування зміцнюваного поверхневого шару застосовувалися з метою забезпечення оптимальних умов трибоконтакту в процесі роботи фрикційної пари з урахуванням декількох механізмів зношування, цікаво було визначити, як матеріал електродів розподіляється на зміцнюваній поверхні в процесі електроімпульсної її обробки.

Дослідження методом скануючої електронної мікроскопії поверхонь зразків, зміцнених за допомогою імпульсного електричного розряду великої потужності пакетом різнойменних електродів, зйомкою шліфів ділянок поверхні в характеристичному випроміненні (на рис. 4) встановлено, що при цьому має місце взаємодія матеріалів електродів з основою з певним їх розподілом по зміцнюваній поверхні.

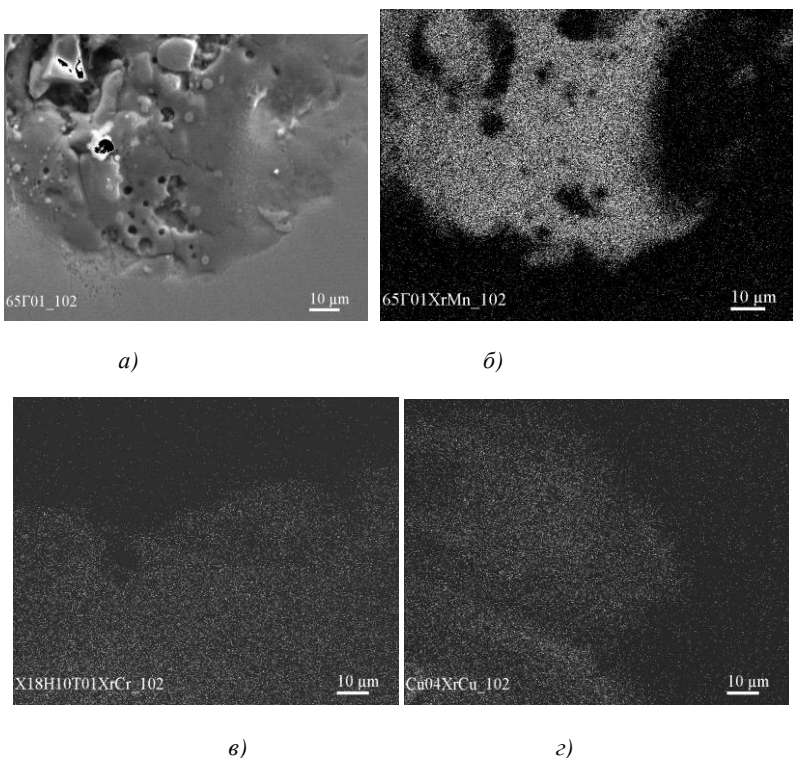


Рис. 4. Електронно-мікроскопічні зображення в характерному випромінні ділянки поверхні сформованої дією електричного розряду пакетом різнойменних електродів: а) загальний вигляд ділянки; б) вигляд ділянки у Mn-випромінненні; в) вигляд ділянки у Cr-випромінненні; з) вигляд ділянки у Cu-випромінненні

Такий стан модифікованої поверхні створює передумови для реалізації прояву найкращих характеристик матеріалів електродів в процесі роботи пари, яка знаходиться в умовах фрикційного контакту, коли спостерігається значне збільшення одночасної дії різних характеристик матеріалів електродів, які сприяють підвищенню зносостійкості зміцненого поверхневого шару.

Таким чином, металографічні й електронно-мікроскопічні дослідження зміцнених зразків показують, що дія електричного розряду сприяє формуванню покриття градієнтного типу, яке може впливати на формування напружено-деформованого стану

зміцнюваного зразка, що певною мірою визначає рівень його механічних властивостей.

В результаті експериментальних досліджень за допомогою приладу ПМТ-3 встановлено, що твердість змінюється в бік збільшення в напрямку від основи до покриття (рис. 5) і визначається видом електрода, причому світлопольні ділянки характеризуються твердістю 8,3–16,2 ГПа, а темні ділянки – 5,5–8,4 ГПа.

Відрізняються твердістю і дискретні ділянки, сформовані розрядом між різними видами електродів. При використанні електрода зі сталі 65Г твердість покриття змінюється в межах 9,9–3,0 ГПа, при використанні сталі Х18Н10Т – 8,3–4,4 ГПа, а мідний електрод забезпечує зміну твердості від 6,3 до 2,6 ГПа. Товщина покриттів для різних електродів складає 250–980, 280–998 і 250–820 мкм відповідно. Твердість “білого шару” змінюється, знижуючись у напрямку від периферійної зони довкола кратера до його кромки, і має значення 8,3–6,2 ГПа. Мікротвердість наступного зміненого шару становила 574 МПа, перехідної зони – 464 МПа, в той час як основа має величину 254–274 МПа.

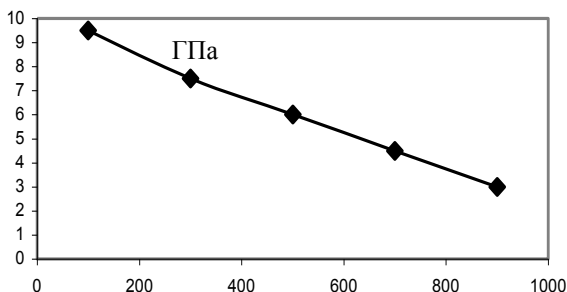


Рис. 5. Характер зміни твердості зразка навколо кратера, що утворився під дією електричного розряду

Висновки. В результаті виконаних досліджень встановлено, що для важконавантажених пар тертя, які працюють в умовах фрикційного контакту, можливе підвищення зносостійкості внаслідок формування на їх поверхні модифікованого шару мозаїчного типу визначеної топографії з градієнтною структурою шляхом дії імпульсного електричного розряду великої потужності.

Запропоновано методологію зміцнення важконавантажених фрикційних пар, яка полягає у формуванні дією імпульсного електричного розряду визначеної топографії модифікованого

поверхневого шару дискретного типу з урахуванням фізико-механічних.

Встановлено, що під дією потужного електричного розряду на оброблюваній поверхні формується дискретне градієнтне покриття зі зміною твердості від поверхні до основи, яка обумовлена зміною її структури і складу в результаті швидкісної кристалізації розплаву в місцях контакту електрода з поверхнею основи.

Список використаної літератури:

1. *Антонюк В.С.* Новое в формировании упрочняющих покрытий фрикционных поверхностей / *В.С. Антонюк, М.С. Дигам* // Сучасне машинобудування. – № 1. – К., 1999. – С. 105–110.
2. *Самсонов Г.В.* Применение электроискрового легирования металлических поверхностей для их упрочнения : тезисы докладов / *Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Е.А. Зайцев.* – К. : Наукова думка.
3. *Верхотуров А.Д.* Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / *А.Д. Верхотуров.* – Владивосток : Дальнаука, 1992. – 175 с.
4. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / *Б.А. Ляшенко, Ю.А. Кузема, М.С. Дигам и др.* – К. : ИПП АН УССР, 1984. – 57 с.
5. Упрочнение поверхностей деталей машин комбинированными способами / *А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.Н. Смоленцев и др.* – М. : Машиностроение, 1991. – 144 с.
6. *Антонюк В.С.* Оптимальное конструирование износостойких инструментальных покрытий / *В.С. Антонюк* // Зб. наук. пр. Нац. тех. ун-ту “Харківський політехнічний університет”. – Харків, 2002. – Вип. 1(5). – С. 25–31.
7. *Волкогон В.М.* Формирование упрочняющих покрытий под действием мощного электрического разряда / *В.М. Волкогон, С.К. Аврамчук, Е.В. Стрелец* // Матер. V Междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий». – К. : АТМ України, 2005. – С. 48–51.
8. *Волкогон В.М.* Влияние материала электрода на структуру и свойства поверхностного слоя сталей после воздействия импульсного электрического разряда большой мощности / *В.М. Волкогон, С.К. Аврамчук, М.В. Бобер и др.* // Матер. VII

Международ. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий». – К. : АТМ України, 2007. – С. 33–38.

БОБЕР Михайло Вікторович – науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство;
- порошкова металургія.

ВОЛКОГОН Володимир Михайлович – доктор технічних наук, завідувач відділом Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

- інструментальне матеріалознавство.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри виробництва приладів, приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- зносостійкі покриття;
- різальний інструмент.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2013

Бобер М.В., Волкогон В.М., Антонюк В.С. Підвищення зносостійкості фрикційних пар створенням градієнтних структур металічних сплавів

Бобер М.В., Волкогон В.М., Антонюк В.С. Повышение износостойкости фрикционных пар созданием градиентных структур металлических сплавов

Bober M.V., Volkogon V.M., Antoniuk V.S. Pidvischennya znosostiykosti friktsiynih pairs stvorenyam gradientnih structures metalichnih splaviv

УДК 539.87:621.9.048

Повышение износостойкости фрикционных пар созданием градиентных структур металлических сплавов / М.В. Бобер, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк

Представлены результаты исследований влияния технологических режимов процесса электроискровой обработки металлических поверхностей на характер формирования топографии и структуры поверхностного слоя. Определены параметры топографии упрочненной поверхности с градиентной структурой на основе металлических сплавов, полученных под действием импульсного электрического разряда большой мощности. Предложена методология упрочнения тяжело нагруженных фрикционных пар, которая состоит в формировании импульсным электрическим разрядом определенной топографии модифицированного поверхностного слоя дискретного типа, с учетом его физико-механических характеристик.

УДК 539.87:621.9.048

Pidvischennya znosostiykosti friktsiynih pairs stvorenyam gradientnih structures metalichnih splaviv / M.V. Bober, V.M. Volkogon, V.S. Antoniuk

The article there's presented the results of metal surfaces treatment electric-spark process technological modes influence research on the nature of the formation of topography and structure of the surface layer. The parameters of the topography of the hardened surface with a gradient structure on the basis of metal alloys produced by the action of a pulsed high-power electric discharge were defined. The methodology of hardening of heavily loaded friction pairs, which consists in forming a pulsed electric discharge particular topography of the modified surface layer of discrete type, based on its physical and mechanical characteristics.

