



УДК 669.01:621.9

© 2011

М. В. Бобер, В. М. Волкогон, С. К. Аврамчук, Н. Г. Палагута,
А. О. Скринька

Особливості формування топографії і структури зносостійких покриттів мозаїчного типу дією імпульсного електричного розряду

(Представлено академіком НАН України С. О. Фірстовим)

Наведено дані щодо дослідження впливу технологічних параметрів процесу обробки металевих поверхонь потужним імпульсним електричним розрядом на їх топографію, структурний стан і механічні характеристики сформованого покриття мозаїчного типу.

Застосування зносостійких покриттів на поверхнях пар, що працюють в умовах фрикційного контакту, наприклад, рейка — колесо, є одним з перспективних шляхів підвищення надійності та терміну їх експлуатації, при цьому механічна міцність гарантується властивостями основи, а опір дії зовнішніх факторів (зносу) досягається локальним формуванням поверхневих шарів з високими фізико-механічними характеристиками.

Покращення механічних властивостей поверхонь можна здійснити різними способами, серед яких найбільш ефективними є електрофізичні методи, що базуються на використанні висококонцентрованих потоків енергії, наприклад, дії на поверхню імпульсного електричного розряду [1].

В Інституті проблем матеріалознавства НАН України останнім часом розроблюється метод поверхневого зміцнення, який полягає в обробці поверхні імпульсним електричним розрядом великої потужності з утворенням на ній визначеної мозаїчної архітектури покриття, що має дискретний характер [2]. При дискретному характері розміщення кратерів від дії іскрового електричного розряду на зміцнюваній поверхні формується напружено-деформований її стан і рівень залишкових напруг, який визначається топографією поверхні, — фрагментованістю і параметрами дискретного шару [3]. Зносостійкість зміцненої таким способом поверхні буде забезпечуватись структурою, яка є подібною до антифрикційних матеріалів, побудованих за правилом Шарпі. Топографія зміцнюваної поверхні залежить

від електричних параметрів процесу електроіскрової обробки, технологічних параметрів, вплив яких на її характер і структуру не вивчався.

Розрахунки, виконані на основі аналізу напружено-деформованого стану такого покриття на елементах фрикційної пари, дали можливість здійснити їх проектування за принципом його мінімізації. Обґрунтовано вибір таких конструктивних параметрів покриттів дискретного типу, як суцільність, розмір ділянки та її глибина з урахуванням фізико-механічних характеристик з умови виключення когезійного розтріскування, мінімуму концентрації напруг та обмеження допустимих напруг при стисканні [4].

Згідно з розрахунками за критерієм мінімального напруженого стану покриття та експериментальними даними досліджень, оптимальною є його суцільність в межах $\psi^{\text{опт}} = \psi_{\text{кр}}^{\text{опт}} = S_{\text{кр}}/S_0 = 55\text{--}65\%$ [5], при якій має місце найменше значення концентрації напруг, де $S_{\text{кр}}$ — площа поверхні з дискретними включеннями; S_0 — загальна площа зміцнюваної поверхні.

Крок включення a приймається з умови

$$a = k_a \sqrt{\frac{\pi D_{\text{max}}^2}{4\Psi^{\text{опт}}}}$$

Тут k_a — коефіцієнт; $D_{\text{max}} \leq C_n = -\frac{1}{k} \ln \left[0,1 + \frac{\sigma_n^{\text{ост}}}{\varepsilon_{\text{кр}} E_n} \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_0 H_0} \right) \right]$ — максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття, де C_n — максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті; $\sigma_n^{\text{зал}}$ — нормальні залишкові напруги в покритті; $\varepsilon_{\text{кр}}$ — критична деформація основи, перевищення якої призводить до когезійного розтріскування; E_0, E_n — модулі пружності матеріалу основи і покриття, відповідно; H_0, h_n — товщина основи і покриття, відповідно.

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних режимів процесу електроіскрової обробки металевих поверхонь на характер формування їх топографії та структуру поверхневого шару.

Методики експериментів та досліджень. Для досліджень брали зразки рейкової сталі марки М76 або М75, склад яких наведено в табл. 1.

Електроіскрову обробку поверхні досліджуваних зразків рейкової сталі проводили дисковим електродом із сталі 65Г, поєднаним з однофазним генератором постійного струму для видачі електричних імпульсів з частотою до 100 Гц і потужністю до 25 кВт, при цьому щільність потоку досягала $10^5\text{--}10^6$ А/см², а температура в каналі розряду — $(8 \cdot 10)^3$ °С.

Під час зворотно-поступального руху електрода вздовж деталі генератор виробляв електричні імпульси постійної частоти, амплітуди та протяжності, при цьому щільність покриття поверхні мозаїчним шаром регулювалася за рахунок зміни швидкості переміщення електрода відносно зміцнюваної поверхні.

Розмір кратерів, їх розташування та регулярність вивчали за допомогою мікроскопу МБС-9 при 60-кратному збільшенні. На ділянках однакового розміру зразків встановлювали загальну кількість кратерів та їх розміри і визначали суцільність покриття, розра-

Таблиця 1. Склад рейкової сталі марки М76 та М75

Тип рейки	Марка сталі	Вміст елементів, %				
		Вуглець	Марганець	Кремній	Фосфор	Сірка
Тв60	М76	0,71–0,82	0,75–1,05	0,18–0,40	≤ 0,035	≤ 0,040
Тв65	М75	0,67–0,80	0,70–1,00	0,13–0,28	≤ 0,040	≤ 0,040

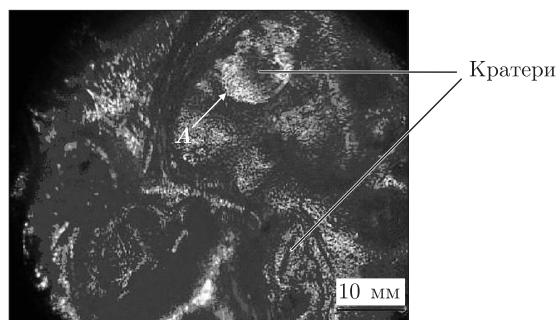


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні зразка після обробки потужним електричним розрядом

ховану як відношення площі зразка, зайнятого кратерами $S_{кр}$, до досліджуваної площі поверхні S_0 .

Мікроструктуру зразків рейкової сталі, отриманої електроімпульсною обробкою, вивчали за допомогою металографічного мікроскопу МІМ-10 та електронного мікроскопу Jeol T-20. Мікротвердість зразків вимірювали пірамідкою Віккерса за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 1Н. Порівняльні випробування на знос зразків з різною суцільністю покриття здійснювали за методикою [6], визначаючи зменшення їх маси в процесі тертя.

Обговорення одержаних результатів. Характеристики дискретного покриття, сформованого на рейковій сталі М76, загальний вигляд якого наведено на рис. 1, значною мірою залежать від технологічних параметрів процесу, про що свідчать дані табл. 2.

На зміцненій поверхні зразків спостерігаються світлі та темні ділянки, причому світлі ділянки являють собою верхні шари матеріалу навколо кратера. Електронно-мікроскопічні та металографічні дослідження поперечного розрізу поверхневого шару, сформованого дією імпульсного електричного розряду, показали наявність трьох зон — “білого шару” (рис. 2, а), що не піддається травленню і не виявляється металографічним методом, під яким знаходиться безпористий шар товщиною 80 мкм, який складається з мартенситу та карбідів (рис. 2, б). Нижче розміщується пластична перехідна зона товщиною 35–40 мкм (рис. 2, в),

Таблиця 2. Вплив показників технологічних параметрів процесу формування дискретних покриттів на їх характеристики

Технологічні параметри процесу				Характеристики дискретного покриття		
Сила струму I , А	Напруга U , В	Швидкість переміщення деталі, м/с	Частота імпульсів, Гц	Діаметр ділянки d , мм	Глибина проникнення матеріалу електроду h , мм	Щільність дискретних ділянок ψ , %
15–20	10–200	0,5–0,7	100	3–4	0,1–0,4	35–40
20–100	25–40	0,7–1,0	100	4–5	0,1–0,4	40–45
				5–6	0,3–1,5	
20–100	25–40	0,5–0,7	100	4–5	0,2–0,5	45–55
				5–6	0,3–1,5	
50–100	25–40	0,7–1,0	100	5–7	0,2–0,5	55–65
				7–8	0,3–1,2	
50–100	25–40	0,5–0,7	100	5–7	0,2–0,5	70–75
				7–8	0,3–0,7	

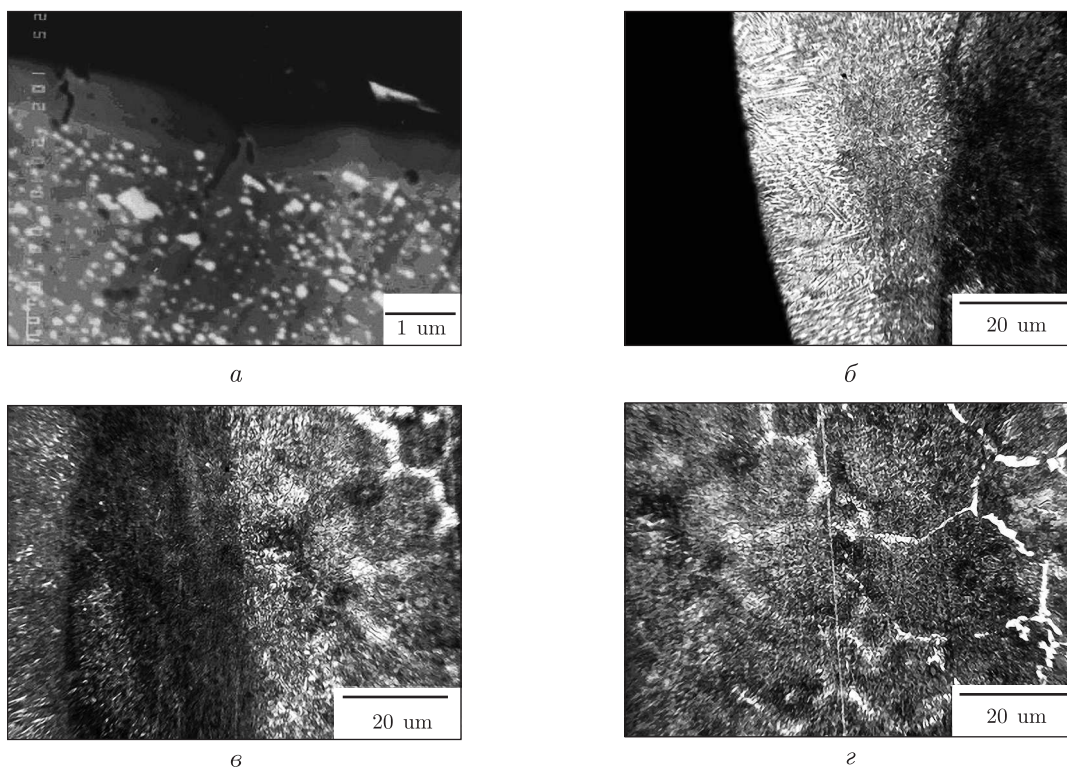


Рис. 2. РЕМ-зображення (а) та оптичне металографічне зображення (б-г) мікроструктури поверхні зразка, зміцненої дією електричного розряду: а — “білий шар”, що виникає на поверхні внаслідок дії електричного розряду; б — мікроструктура верхнього шару поверхні зміцненого зразка; в — мікроструктура проміжного шару поверхні зміцненого зразка; г — мікроструктура поверхні зміцнюваного зразка

яка виникає за рахунок протікання процесів взаємної дифузії матеріалу електрода. Її мікроструктуру представлено троститом з карбідною сіткою. Мікроструктура матеріалу основи складається з фериту, перліту та цементитної сітки (рис. 2, г).

З наведених даних видно, що під дією електричного розряду спостерігається помітне подібнення структури поверхневого шару, що, на думку авторів [7], свідчить про його нагрівання до температури алотропного перетворення крупнозернистого α -заліза в мілкодисперсну γ -фазу, яка при подальшому швидкому охолодженні знову переходить в α -залізо без зміни розміру зерна. Високу швидкість охолодження, яка супроводжується значними змінами об'єму і, як наслідок, виникненням значних внутрішніх залишкових напружень розтягу, підтверджує наявність тріщин втоми на “білому шарі” (рис. 2, а). Отримані результати свідчать про те, що під дією електричного розряду формується мозаїчне покриття градієнтного типу, топографія якого впливає на формування напружено-деформованого стану зміцнюваної поверхні [3] і, як наслідок, на рівень механічних властивостей.

Оскільки одним із факторів, який істотно впливає на зносостійкість зміцненої поверхні, є її твердість, то мікродюриметричному дослідженню підлягали як поверхня “білого шару” навколо кратера, так і шари зміненої структури самого кратера в поперечному розрізі. Твердість “білого шару” змінюється, знижуючись у напрямку від периферійної зони довкола кратера до його кромки (за стрілкою А, рис. 1), 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.

Таблиця 3. Вплив суцільності покриття, сформованого імпульсним електричним розрядом, на його зносостійкість

Характеристика покриття	Суцільність, %					Без покриття
	35	45	55	65	75	
Відносний знос	0,8	0,7	0,6	0,6	0,75	1,0

Результати випробувань зносостійкості зразків, зміцнених дією імпульсного електричного розряду, що мали різну суцільність покриття, наведено в табл. 3. Вони свідчать про те, що існує оптимальне значення суцільності мозаїчного покриття, яке знаходиться в межах 55–65%, при якому забезпечується максимальне збільшення зносостійкості.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що топографія зміцнюваної металевої поверхні, яка формується під дією потужного імпульсного електричного розряду, залежить від технологічних параметрів процесу електроіскрової обробки. Оптимальної суцільності покриття зміцнюваної поверхні порядку 55–65 % можна досягти за рахунок правильного сполучення електричних параметрів розряду (частота імпульсів, величина розряду) і швидкості взаємного переміщення електрода відносно оброблюваної деталі. В процесі електроіскрової обробки металевої поверхні формується градієнтна мікроструктура, що складається з трьох шарів, які відрізняються загальним станом та властивостями, причому її дисперсність і твердість зменшуються в напрямку від поверхні до основи зміцнюваного матеріалу, що, за даними практичних випробувань зміцнених трамвайних рейок [8], сприяє підвищенню зносостійкості його поверхні до 2,5–3 разів.

Наявність у поверхневому шарі легованих ділянок, які не руйнуються в процесі тертя, перериває пластичну течію поверхні, що значною мірою знижує схильність поверхні до зчеплення. Збільшення кількості легованих ділянок поверхні фрикційного контакту підвищує ефект опору руйнування, але до визначеної межі, після якої спостерігається відшарування крупних частинок. При подальшому збільшенні суцільності покриття відбувається крихке руйнування втоми, що дає підстави зробити висновок про переваги дискретного покриття перед суцільним.

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. – Москва: Изд-во АН СССР, 1959. – 184 с.
2. Волкогон В. М., Аврамчук С. К., Стрелец Е. В. Формирование упрочняющих покрытий под действием мощного электрического разряда // Матер. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. “Инженерия поверхности и реновация изделий”. – Киев: АТМ України, 2005. – С. 48–51.
3. Волкогон В. М., Аврамчук С. К., Павличук Т. В. та ін. Визначення оптимальної топографії робочих поверхонь фрикційних пар тертя, зміцнених дією імпульсного електричного розряду // Наук. нотатки. – 2007. – Вип. 20 (2). – С. 23–29.
4. Волкогон В. М., Аврамчук С. К., Антоноук В. С. и др. Оптимизация плотности упрочняющих дискретных покрытий с учетом напряженно-деформированного состояния системы “включение – основа” // Матер. Междунар. конф. “Современное материаловедение: достижения и проблемы”. – Киев, 2005. – С. 584–585.
5. Волкогон В. М., Дігам М. С., Антоноук В. С. та ін. Особливості формування зміцнюючих покриттів на рейках та їх характеристики в умовах потужного електричного розряду // Зб. наук. статей “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – Київ, 2006. – С. 454–457.
6. Крагельский И. В. Трение и износ. – Москва: Машгиз, 1962. – 383 с.
7. Грозин Б. Д., Нижник С. Б. Фазовые и структурные изменения в углеродистой стали при импульсном воздействии высоких температур и давлений // Физика металлов и материаловедение. – 1961. – 12, № 1. – С. 84–90.

8. Волкогон В. М., Аврамчук С. К., Павличук Т. В., Бобер М. В. Особенности и эффективность упрочнения рельс действием мощного импульсного электрического разряда // Сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. "Актуальные проблемы физики твердого тела". – Минск: Объед. ин-т физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси. – 2007. – Т. 3. – С. 422–425.

*Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 23.06.2010

**M. W. Bober, V. M. Volkogon, S. K. Avramchuk, N. G. Palaguta,
A. O. Skrynka**

Specific features of the formation of a topography and a structure of antiwear coverings of the mosaic type by the action of electric pulses

The data on the influence of technological parameters of the processing of metal surfaces by a powerful pulse electrical discharge on their topography, the structural state, and the mechanical characteristics of a formed covering of the mosaic type are given.