

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669:539.43:539.56

І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ПРОЙДАК<sup>1</sup>, З. СТРАДОМСКІ<sup>2</sup>, В. А. ДЯДЬКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>1</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>2</sup>Фак. «Технологія обробки матеріалів і прикладна фізика інституту інженерного матеріалознавства», Ченстоховський технологічний університет, вул. Армії Крайової, 19, Ченстохов, Польща, 42-200, тел. +48 (34) 325 07 38, ел. пошта zbigniew@wip.pcz.pl

### ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ІСКРОВОГО РОЗРЯДУ НА ТВЕРДІСТЬ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

**Мета.** Метою роботи є оцінка впливу електричної іскрової обробки на стан поверхневого нашарування вуглецевої сталі, що формується. **Методика.** Матеріалом для дослідження була сталь фрагменту ободу залізничного колеса з хімічним складом 0,65 % С, 0,67 % Мп, 0,3 % Si, 0,027 % Р, 0,028 % S. Структурні дослідження проводилися з використанням світлової мікроскопії й методик кількісної металографії. Структурний стан досліджуваної сталі відповідав стану після гарячої пластичної деформації. Аналіз розподілу мікротвердості в мікрооб'ємах металу катоду проводили з використанням мікротвердоміра типу ПМТ-3. Електричну іскрову обробку поверхні вуглецевої сталі виконували з використанням устаткування типу ЕФІ-25М. **Результати.** Після електричної іскрової обробки поверхні зразка вуглецевої сталі спостерігали формування багаточарового покриття. Аналіз мікроструктури показав існування якісних розбіжностей у внутрішній будові металу покриття в залежності від ділянки, яка досліджується. Отримані в роботі результати підтверджують відомі положення, що формування поверхневого покриття за технологією електричного іскрового розряду визначається умовами переносу й кристалізації металу. Градієнт структур по товщині покриття значною мірою обумовлений розвитком процесів структурних перетворень подібних впливові термічного характеру. **Наукова новизна.** У результаті електричної іскрової обробки, за умов однакового металу анода і катоду, сформований перший прошарок покриття за зовнішніми ознаками відповідає однофазному стану. В об'ємі металу покриття поява часток карбідної фази супроводжується зниженням значень твердості. **Практична значимість.** Формування багаточарового поверхневого покриття при електричній іскровій обробці супроводжується виникненням градієнту структур за його товщиною. За досягненим рівнем ефект поверхневого зміцнення від іскрового розряду може бути конкурентоспроможним більшості термічних та хіміко-термічних технологій обробки поверхні металевих матеріалів.

*Ключові слова:* мікротвердість; електричні розряди; мікроструктура; вуглецева сталь

#### Вступ

Порівняно з відомими поверхневими обробками, коли формування поверхневого шару відбувається завдяки розвитку процесів дифузійного масопереносу, технології електричного іскрового легування мають свої особливості. Ураховуючи, що процес переносу металу від

одного електрода на поверхню іншого заснований на механізмі руйнування (ерозії) матеріалу анода при іскровому розряді, стан міжелектродного середовища має важливе значення [7].

При електроіскровій обробці у більшості випадків відбувається руйнування матеріалу анода, а на поверхні катода утворюється нашарування

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

з різною структурою і фізико-хімічними властивостями [16]. До основних переваг електроіскрового легування слід віднести необмеженість по кількості використання різноманітних металів і хімічних з'єднань для формування покриття [14, 15]. З іншого боку, одночасний розвиток декількох процесів може приводити до непередбачуваних результатів відносно властивостей сформованого поверхневого нашарування [13]. На основі цього виникає інтерес щодо проведення роздільної оцінки впливу легування і самого електричного розряду на структуру і властивості металевого матеріалу, що піддається обробці.

### Мета

Метою роботи є оцінка впливу електричної іскрової обробки на стан поверхневого нашарування вуглецевої сталі, що формується.

### Методика

Як матеріал для анода і катода була використана однакова сталь фрагменту ободу залізничного колеса з хімічним складом 0,65 % С, 0,67 % Mn, 0,3 % Si, 0,027 % P, 0,028 % S. Структурні дослідження виконувалися з використанням світлової мікроскопії і методик кількісної металографії [4]. Структурний стан досліджуваної сталі відповідав стану після гарячої пластичної деформації. Електричну іскрову обробку поверхні вуглецевої сталі виконували з використанням устаткування типу ЕФІ-25М.

Аналіз розподілу властивостей міцності в мікрооб'єктах металу катода виконували з використанням мікротвердоміра типу ПМТ-3. З урахуванням сформованих дуже тонких нашарувань, навантаження на індентор було обране 10 г.

Формування електричного іскрового розряду обумовлено рухом електронів з визначеним критичним значенням кінетичної енергії, що призводить до іонізації атомів газів в міжелектродному проміжку [7]. З іншого боку, залежно від умов формування самого розряду досягаються різні за якісними показниками ефекти при формуванні шару покриття.

Так, за технологією з вібруючим електродом і генератором залежних імпульсів у загальному випадку рух анода до катода супроводжується зростанням напруги електричного поля до величини, достатньої для пробую міжелектродно-

го проміжку [14]. Сформований канал у вигляді пучка електронів починає взаємодіяти з поверхнею анода. Локалізація виникаючої енергії призводить до розплавлення і випаровування матеріалу анода. Після досягнення необхідної рідкоплинності краплина розплаву відділяється від анода і рухається в напрямку катода. При цьому швидкість руху краплини рідкого металу повинна випереджати переміщення самого анода.

Ураховуючи високі швидкості охолодження рідини, в момент досягнення рідким металом поверхні катода відбувається достатньо швидка його кристалізація, а наступний механічний імпульс від анода завершує етап формування шару покриття.

На основі виконаних досліджень встановлено, що процес формування покриття значною мірою залежить від співвідношення між силою електричного струму короткого замикання і енергією імпульсу [15, 16]. Для устаткування типу ЕФІ-25М характерною ознакою є високий рівень електричного струму короткого замикання і низька енергія імпульсу.

### Результати

Після електричної іскрової обробки поверхні зразка вуглецевої сталі спостерігали



Рис. 1. Мікроструктура вуглецевої сталі залізничного колеса. Збільшення 800

Fig. 1. Microstructure of carbon steel of railway wheel. Increase 800

формування нашарувань. Порівняно з вихідним станом металу залізничного колеса (рис. 1), яке відповідає стану після гарячої пластичної де-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

формації, на перетині зразку після вказаної обробки виникають додаткові шари металу (рис. 2) з якісними відмінностями внутрішньої будови.

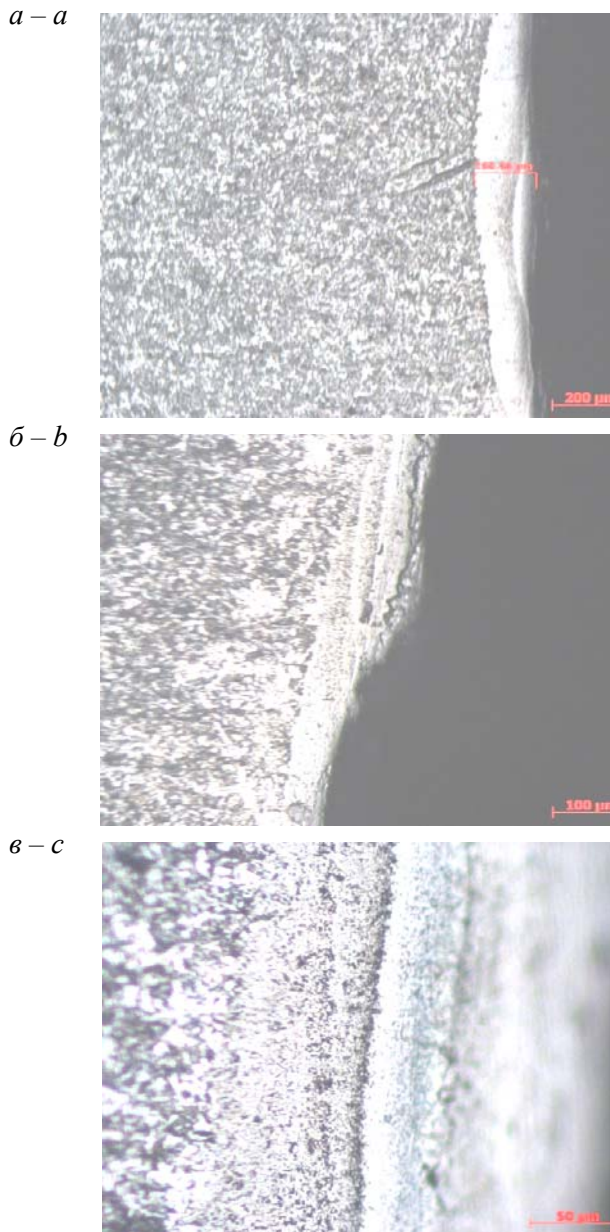


Рис. 2. Мікроструктура нашарувань після електричної іскрової обробки зразка вуглецевої сталі. Збільшення: (а) – 50, (б) – 100, (в) – 200.

Fig. 2. The microstructure of layers after electrical spark treatment of the carbon steel sample. Increase: (a) – 50, (b) – 100, (c) – 200.

Ураховуючи, що осаджений на поверхні зразку шар покриття в дійсності являє собою продукти ерозії анода [7, 13], відмінності в мік-

роструктурі не можуть бути зумовлені зміною хімічного складу металу. Більше того, різна товщина і якість поверхні сформованого покриття може розглядатися як результат сумарного впливу від нестационарних умов перенесення краплин рідкого металу і наступної кристалізації.

За дослідженнями мікроструктури першого шару покриття (рис. 2 а, б) можна говорити про значну подібність з аналогічними нашаруваннями, коли як анод використовують складно леговані сталі або сплави [16]. З аналізу результатів [7] видно, що незалежно від співвідношення хімічних компонентів, типу кристалічної решітки та ін., високі швидкості розплавлення металу на поверхні анода, переносу його до катода і остаточна прискорена кристалізація обумовлюють формування металевого покриття з дуже низькою концентрацією дефектів кристалічної будови. Отримані в роботі результати мають якісне підтвердження відомим даним.

Так, аналіз мікроструктури сформованого покриття (рис. 2 а, б) вказує на відсутність міжфазних і великокутових меж розподілу. На підставі цього металеве покриття, у першому наближенні, може бути віднесеним до однофазного стану. З іншого боку, не зовсім зрозуміло, якщо матеріалом анода є вуглецева сталь з вмістом вуглецю 0,65 %, то після розплавлення, переносу краплини і кристалізації чим зумовлена відсутність в структурі покриття часток карбідної фази? Порівняльний аналіз з аналогічними процесами переносу рідкого металу, наприклад при електродуговому зварюванні, не пояснює природи формування однофазної структури.

Дійсно, з урахуванням ідентичності процесу переносу рідкого металу при формуванні зварного з'єднання (технологія електричного дугового зварювання з використанням електроду, що плавиться), структурний стан металу ванни після кристалізації практично не відрізняється від металу електрода [12].

При мікроструктурних дослідженнях по товщині першого прошарку момент появи ознак часток другої фази можна розглядати як межу, яка визначає формування другого шару покриття (рис. 2, в). До особливостей внутрішньої будови слід віднести нерівномірність розташування часток другої фази по його товщині. При чому кількість часток поблизу з межею, що

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

розділяє перший і другий прошарки покриття, значно перебільшує їх кількість в інших мікроб'ємах.

Положення наступної межі (по товщині поверхневих нашарувань) визначається моментом появи мікроструктури металу, що відповідає вихідному стану.

Таким чином, у випадку однакових матеріалів анода і катода, отримані результати підтверджують відомі положення, що формування поверхневого покриття за технологією електричного іскрового розряду визначається умовами переносу і кристалізації металу [7, 13–16].

Гradient структур по товщині покриття значною мірою зумовлений розвитком процесів структурних перетворень від впливів термічного характеру [13, 17].

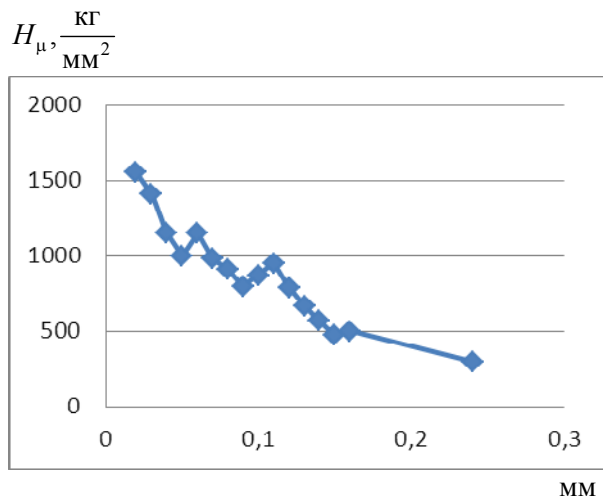


Рис. 3. Зміна мікротвердості металу залежно від відстані від поверхні покриття.

Fig. 3. Metal microhardness change, depending on the distance from the coating surface.

Аналіз характеру розподілу мікротвердості дозволяє визначити зміну рівня властивостей міцності металу по товщині сформованого покриття [1, 5].

Наведену рис. 3 залежність мікротвердості по товщині сформованого покриття необхідно розглядати порівняно з відповідним структурним станом металу (рис. 2). Так, з аналізу мікроструктури товщина першого прошарку покриття (в місці вимірювання мікротвердості) складала значення на рівні 0,17 мм (рис. 2, а). Мікротвердість на вказаній ділянці змінюється від приблизно 1 500, на відстані від поверхні по-

криття 0,02 мм, до 600–700  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  на межі з другим прошарком (рис. 2, в). Далі, до межі з основним металом, мікротвердість неухильно знижується, досягаючи значень 250–300  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  (відстань від поверхні покриття 0,25 мм, рис. 3).

У першому наближенні можна вважати, що оцінка положення межі за мікроструктурними дослідженнями є цілком обґрунтованою, що підтверджується значеннями  $H_{\mu}$  [1]. Однак порівняльний аналіз з відомими результатами вказує як на співпадання абсолютних значень мікротвердості, так і на суттєві розбіжності.

Так, твердість досліджуваного металу у вихідному стані цілком відповідає значенням 240–250  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ , що підтверджується числовими експериментальними даними [3, 11].

Інша справа – абсолютні значення  $H_{\mu}$  для ділянок поблизу з поверхнею першого нашарування (рис. 2, а). При вимірюванні мікротвердості на відстані від поверхні приблизно 0,02 мм були отримані значення, які значно перевищують відомі результати [6, 10]. Справа в тому, що при зменшенні навантаження на індентор отримані результати мікротвердості будуть неухильно збільшуватись [8]. При цьому достатньо суттєве зростання  $H_{\mu}$  починається для навантажень вже від 50 г і менше. З урахуванням вказаного ефекту, використане навантаження на індентор 10 г призвело до цілком зрозумілого збільшення отриманих результатів.

На підставі цього з метою визначення поправкового коефіцієнта, були використані діаграми залежності  $H_{\mu}$  для різних навантажень [8]. Значення поправкового коефіцієнта прийнято рівним 1,7. Дійсно, після врахування ефекту штучного підвищення мікротвердості відкореговані значення  $H_{\mu}$  вже відповідають більшості легованих вуглецевих сталей в стані після повного гартування (800–900  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  [2, 9]).

За рівнем ефект поверхневого зміцнення від іскрового розряду може розглядатися як альтернатива термічним та хіміко-термічним технологіям обробки поверхні металевих матеріалів.



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Наукова новизна та практична значимість**

В результаті електричної іскрової обробки, за умови однакового металу анода і катода, сформований перший прошарок покриття за зовнішніми ознаками відповідає однофазному стану.

В об'ємі металу покриття поява часток карбідної фази супроводжується зниженням значень твердості.

Формування багатощарового поверхневого покриття при електричній іскровій обробці супроводжується виникненням градієнта структур по його товщині.

За досягненим рівнем ефект поверхневого зміцнення від іскрового розряду може бути конкурентноспроможним більшості термічних та хіміко-термічних технологій обробки поверхні металевих матеріалів.

**Висновки**

1. За умови однакового матеріалу анода і катода поверхневі нашарування металу при виникненні електричного іскрового розряду формуються в однофазному стані.

2. Другий прошарок покриття, у вигляді глобулярних структур, перехідною зоною до металу у вихідному стані.

3. Сформовані структури вуглецевої сталі з глобулярною формою цементиту за зовнішніми ознаками подібні тим, що спостерігаються після визначених витримок при субкритичних температурах відпуску.

4. В об'ємі металу покриття поява часток карбідної фази супроводжується зниженням значень мікротвердості.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Бернштейн, М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – М. : Металлургия, 1977. – 431 с.
3. Вакуленко, І. О. Про взаємозв'язок структурних перетворень при втомі вуглецевої сталі з особливостями будови поверхонь руйнування / І. О. Вакуленко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 242–245.
4. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2010. – 124 с.
5. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.
6. Вакуленко, Л. И. Электрическая импульсная обработка металла обода железнодорожного колеса после эксплуатации / Л. И. Вакуленко, В. А. Сокирко, Ю. Л. Надеждин // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 126–132.
7. Верхотуров, А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – К. : Техніка, 1982. – 181 с.
8. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.
9. Дзугутов, М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М. Я. Дзугутов. – М. : Металлургия, 1977. – 480 с.
10. Кузін, О. А. Металознавство та термічна обробка металів / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – К. : Основа, 2005. – 324 с.
11. Мямлин, С. В. Влияние условий эксплуатации на внутреннее строение металла железнодорожных колес / С. В. Мямлин, Л. И. Вакуленко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 164–166.
12. Сварка в машиностроении : справочник. Т. 1. / К. В. Васильев, В. И. Вилль, В. Н. Волченко и др. – М. : Машиностроение, 1978. – 504 с.
13. Kahlon, C. S. Electric spark toughening of cutting tools and steel components / C. S. Kahlon // Intern. J. of Maschine Tool Des. and Research. – 1970. – Vol. 10. – P. 95–121.
14. Langhammer, K. Frasen hochwarmfesten Werkstoffe mit elektrofunkenvfestgen Schnellarbeitstahlwerkzeugen / K. Langhammer // Industrie Anzeigër. – 1971. – Vol. 93, № 51. – P. 1195–1196.
15. Penetron carbide deposition and blast – peening equipment // Machinery and production engineering. – 1972. – Vol. 20, № 3099. – P. 479–480.
16. Vaidyanathan, S. Elektro-funkenverfestung und von werkzeugschneiden / S. Vaidyanathan, H. Schlayer // Industrie Anzeigër. – 1971. – Vol. 93, № 36. – P. 819–820.
17. Vakulenko, I. A. Effect of the morphology and size of iron carbide on the fatigue strength of carbon steels / I. A. Vakulenko, O. N. Perkov // Russ. Metallurgy. – 2008. – № 3. – P. 225–228.

И. А. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ПРОЙДАК<sup>1</sup>, З. СТРАДОМСКИ<sup>2</sup>, В. А. ДЯДЬКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>1</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>2</sup>Фак. «Технология обработки материалов и прикладная физика института инженерного материаловедения», Ченстоховский технологический университет, ул. Армии Краевой, 19, Ченстохов, Польша, 42-200, тел. +48 (34) 325 07 38, эл. почта zbigniew@wip.pcz.pl

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ТВЕРДОСТЬ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**Цель.** Целью работы является оценка влияния электрической искровой обработки на состояние формирующегося поверхностного покрытия углеродистой стали. **Методика.** Материалом для исследования служила сталь фрагмента обода железнодорожного колеса с химическим составом 0,65% С, 0,67% Мп, 0,3% Si, 0,027% Р, 0,028% S. Структурные исследования проводились с использованием световой микроскопии и методик количественной металлографии. Структурное состояние исследуемой стали соответствовало состоянию после горячей пластической деформации. Анализ распределения твердости в микрообъемах металла катода осуществляли с использованием микротвердомера типа ПМТ-3. Электрическую искровую обработку поверхности углеродистой стали выполняли с использованием оборудования типа ЭФИ-25М. **Результаты.** После электрической искровой обработки поверхности образца из углеродистой стали наблюдали формирование многослойного покрытия. Анализ микроструктуры показал существование качественных различий во внутреннем строении металла покрытия в зависимости от исследуемого участка. Полученные в работе результаты подтверждают известные положения, что формирование поверхностного покрытия по технологии электрического искрового разряда определяется условиями переноса и кристаллизации металла. Градиент структур по толщине покрытия в значительной степени зависит от развития процессов структурных превращений, подобных влиянию термического характера. **Научная новизна.** В результате электрической искровой обработки, при условии одинакового металла анода и катода, сформированная первая прослойка покрытия по внешним признакам соответствует однофазному состоянию. В объеме металла покрытия появление частиц карбидной фазы сопровождается снижением значений микротвердости. **Практическая значимость.** Формирование многослойного поверхностного покрытия при электрической искровой обработке сопровождается возникновением градиента структур по толщине. По уровню эффект поверхностного упрочнения от искрового разряда может быть альтернативой большинству термических и химико-термических технологий обработки металлических материалов.

*Ключевые слова:* микротвердость; электрические разряды; микроструктура; углеродистая сталь

I. O. VAKULENKO<sup>1\*</sup>, S. V. PROYDAK<sup>1</sup>, Z. STRADOMSKI<sup>2</sup>, V. A. DIADKO<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>1</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_texmat@ukr.net

<sup>2</sup>Fac. «Technology of Materials Processing and Applied Physics of Institute of Engineering Material Science», Czestochowa University of Technology, Armi Krajowej St., 19, Czestochowa, Poland, 42-200, tel. +48 (34) 325 07 38, e-mail zbigniew@wip.pcz.pl

## INFLUENCE OF ELECTRIC SPARK ON HARDNESS OF CARBON STEEL

**Purpose.** The purpose of work is an estimation of influence of an electric spark treatment on the state of mouldable superficial coverage of carbon steel. **Methodology.** The steel of fragment of railway wheel rim served as material for research with chemical composition 0.65% C, 0.67% Mn, 0.3% Si, 0.027% P, 0.028% S. Structural researches were conducted with the use of light microscopy and methods of quantitative metallography. The structural state of the

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

probed steel corresponded to the state after hot plastic deformation. The analysis of hardness distribution in the micro volumes of cathode metal was carried out with the use of microhardness tester of type of PMT-3. An electric spark treatment of carbon steel surface was executed with the use of equipment type of EFI-25M. **Findings.** After electric spark treatment of specimen surface from carbon steel the forming of multi-layered coverage was observed. The analysis of microstructure found out the existence of high-quality distinctions in the internal structure of coverage metal, depending on the probed area. The results obtained in the process are confirmed by the well-known theses, that forming of superficial coverage according to technology of electric spark is determined by the terms of transfer and crystallization of metal. The gradient of structures on the coverage thickness largely depends on development of structural transformation processes similar to the thermal character influence. **Originality.** As a result of electric spark treatment on the condition of identical metal of anode and cathode, the first formed layer of coverage corresponds to the monophase state according to external signs. In the volume of coverage metal, the appearance of carbide phase particles is accompanied by the decrease of microhardness values. **Practical value.** Forming of multi-layered superficial coverage during electric spark treatment is accompanied by the origin of structure gradient on a thickness. The effect of the superficial work-hardening from a spark according to a level can be an alternative to majority of thermal and chemical-thermal technologies of treatment of metallic materials.

*Keywords:* microhardness; electric discharges; microstructure; carbon steel

## REFERENCES

1. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.Ye. *Deformatsionnoye stareniye stali* [Strain aging of the steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 320 p.
2. Bernshteyn M.L. *Struktura deformirovannykh metallov* [Structure of deformed metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 431 p.
3. Vakulenko I.O. Pro vzaiemozviazok strukturnykh peretvoren pry vtomi vuhletsevoi stali z osoblyvostiamy budovy poverkhon ruinovannia [On the interrelation of structural transformations with fatigue of carbon steel with structure features of the break surfaces]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 242-245.
4. Vakulenko I.O. *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis on material science]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
5. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Structure morphology and strain hardening of steel]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
6. Vakulenko L.I., Sokirko V.A., Nadezhdin Yu.L. Elektricheskaya impulsnaya obrabotka metalla oboda zheleznodorozhnogo kolesa posle ekspluatatsii [Electric pulse treatment of metal railway wheel rim after operation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2013, no. 1 (43), pp. 126-132.
7. Verkhoturov A.D., Mukha I.M. *Tekhnologiya elektro-iskrovogo legirovaniya metallicheskiykh poverkhnostey* [Technology of electrospark alloying of metal surfaces]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1982. 181 p.
8. Grigorovich V.K. *Tverdost i mikrotverdost metallov* [Hardness and microhardness of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 230 p.
9. Dzugutov M.Ya. *Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 480 p.
10. Kuzin O.A., Yatsiuk R.A. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal technology and heat treatment of metals]. Kyiv, Osnova Publ., 2005. 324 p.
11. Myamlin S.V., Vakulenko L.I. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na vnutrenneye stroyeniye metalla zheleznodorozhnykh koles [The influence of operating conditions on the internal structure of metal of railway wheels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 164-166.
12. Vasilyev K.V., Vill V.I., Volchenko V.N. *Svarka v mashinostroyenii. Spravochnik. T. 1.* [Welding in mechanical engineering. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 504 p.
13. Kahlon C.S. Electric spark toughening of cutting tools and steel components. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1970, vol. 10, pp. 95-121.
14. Langhammer K. Frasen hochwarmfesten Werkstoffe mit elektrofunkenvrfestgen Schnellarbeitstahlwerkzeugen. *Ind Ans*, 1971, Bd. 93, H. 51, pp. 1195-1196.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

---

15. Penetron carbide deposition and blast – peening equipment. *Machinery and production engineering*, 1972, vol. 20, no. 3099, pp. 479-480.
16. Vaidyanathan H. Schlager. Elektrofunkenverfestung und von werkzeugschneiden. *Ind Ans*, 1971, Bd. 93, no. 36, pp. 819-820.
17. Vakulenko I.A., Perkov O.N. Effect of the morphology and size of iron carbide on the fatigue strength of carbon steels. *Russian Metallurgy*, 2008, no. 3, pp. 225-228.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. А. Заблудовським (Україна); к.т.н., доц. О. О. Чайковським (Україна)*

Надійшла до редколегії 10.02.2014

Прийнята до друку 27.03.2014