

УДК 621.9.048 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.67.4

О.П. Гапонова

Сумський державний університет

**АНАЛІЗ ЯКОСТІ КОМПЛЕКСНИХ СУЛЬФОЦЕМЕНТОВАНИХ ПОКРИТТІВ,  
ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ**

*Проведений аналіз якості поверхневих шарів після сульфоцементзації методом електроіскрового легування. Металлографічні дослідження показали, що характерний для електроіскрових покриттів білий шар не виражений. Поверхневий шар складається з дифузійної зони, товщина якої збільшується зі зростанням енергії розряду, і основного металу. Дюрометричні дослідження сульфоцементованих покриттів свідчать про те, що в поверхневому шарі утворюються дві зони: зона зниженої мікротвердості та зміцнений шар. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу, приповерхневий шар насичений сіркою. Сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4%. Зі збільшенням енергії розряду твердість, глибина шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару, а також шорсткість поверхні збільшуються.*

*Ключові слова:* електроіскрове легування, покриття, сірка, вуглець, мікроструктура, мікротвердість, рентгеноспектральний аналіз, шорсткість.

О.П. Гапонова

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКСНЫХ СУЛЬФОЦЕМЕНТОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ**

*Проведен анализ качества поверхностных слоев после сульфоцементации методом электроискрового легирования. Металлографические исследования показали, что характерный для электроискровых покрытий белый слой не выражен. Поверхностный слой состоит из диффузионной зоны, толщина которой увеличивается с ростом энергии разряда, и основного металла. Дюрометрические исследования сульфоцементованных покрытий свидетельствуют о том, что в поверхностном слое образуются две зоны: зона пониженной микротвердости и упрочненный слой. По данным микрорентгеноспектрального анализа, приповерхностный слой насыщен серой. Сера накапливается в поверхности металла на глубине до 30 мкм, ее концентрация на этом расстоянии составляет около 0,4%. С увеличением энергии разряда твердость, глубина слоя пониженной микротвердости и упрочненного слоя, а также шероховатость поверхности увеличиваются.*

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, покрытие, сера, углерод, микроструктура, микротвердость, рентгеноспектральный анализ, шероховатость.

O. Gaponova

**ANALYSIS OF QUALITY COMPLEX SULFOCEMENTED COATINGS OBTAINED BY  
ELECTROSPARK ALOYING**

*The analysis of quality surface layers after sulfocementation by electrospark alloying is carried out. Metallographic studies are shown that the typical white layer of electrospark coatings is not pronounced. The surface layer consists of a diffusion zone, the thickness of which increases with increasing discharge energy, and the base metal. Durometric studies of sulfocemented coatings are shown that two zones are formed in the surface layer: zone of low microhardness and hardened layer. The surface layer is saturated with sulfur, according to X-ray spectrum analysis. Sulfur accumulates on the metal surface to depth of 30 μm, its concentration at this distance is about 0.4%. With an increase in the discharge energy, the hardness, the depth of the layer of reduced microhardness and the hardened layer, as well as the surface roughness increase.*

*Keywords:* electrospark alloying, coating, sulfur, carbon, microstructure, microhardness, X-ray spectral analysis, roughness.

**Постановка проблеми.** Відомо [1-2], що поліпшення захисних і трибологічних властивостей поверхонь деталей можна досягти за рахунок нанесення спеціальних покриттів, які підвищують твердість, корозійну стійкість, попереджають металевому контакту, знижують коефіцієнт тертя, тобто методи, що гальмують розвинення схоплення, втормозують окиснювальних, корозійно-утомних і абразивних процесів. З цією метою застосовуються методи поверхневого пластичного деформування, модифікування поверхонь термодифузійним насиченням різними елементами, оброблення поверхонь концентрованими джерелами енергії, нанесення гальванічних, газотермічних і інших захисних покриттів [3].

Проведений аналіз причин пошкодження поверхонь тертя деталей машин показав, що в багатьох випадках проблема підвищення зносостійкості трибомеханічних систем вирішується модифікуванням робочих поверхонь деталей методом електроіскрового легування (ЕІЛ) [4, 5]. Метод ЕІЛ дозволяє формувати на металах поверхнево-зміцнені шари із будь яких струмопровідних матеріалів, відрізняється технологічною простотою, низькою енергоємністю, високою міцністю зчеплення нанесеного шару з основою. Важливою позитивною якістю ЕІЛ є

можливість отримувати багатофункціональні градієнтні покриття з дискретною структурою та багатшарові покриття і змінним по товщині фазовим складом [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки проводяться роботи по створенню виробів, які можна було б використовувати без зовнішнього змащування. До цих виробів застосовують термін «самозмащувальні», оскільки при їх експлуатації не використовується зовнішнє мастило, а застосовуються в основному композиційні матеріали з дисульфідом молібдену ( $\text{MoS}_2$ ). Формування і дослідження покриттів на основі дисульфиду молібдену є одним з найбільш перспективних напрямків в області створення твердозмащувальних покриттів [7].

У роботі [8] пропонується спосіб сульфидування, що перешкоджає схоплюванню, який зводиться до створення на поверхні деталі плівки сульфідів. Останні підвищують поверхневу активність металів і сплавів, а також змочування поверхнево активними речовинами й опір схоплюванню. Плівка сульфиду заліза ( $\text{FeS}$ ) підвищує зносостійкість поверхонь тертя і покращує їх припрацьовуваність. Феросульфідне покриття має досить високу пористість і вбирає велику кількість мастила, забезпечуючи матеріалу властивість самозмащування. До недоліків традиційного сульфидування, крім збільшення шорсткості поверхні і розмірів деталі, слід віднести: нагрівання всієї деталі, а відповідно і структурні зміни металу; жолоблення і викривлення; велика тривалість процесу; велика витрата електроенергії; негативний вплив на екологію та ін.

Процес цементації сталевих поверхонь забезпечує підвищення твердості і зносостійкості. У роботі [9], запропонований спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням, який має ряд переваг, основними з яких є: досягнення 100% суцільності зміцненого поверхневого шару; підвищення твердості поверхневого шару деталі, за рахунок дифузійно-гартівних процесів; можливість здійснення легування в зазначених місцях без необхідності в одночасному захисті решти поверхні деталі; відсутність об'ємного нагрівання деталі, а, отже, жолоблення і викривлення; простота застосування технології; гнучка прив'язка до наявного обладнання; процес зміцнення не вимагає спеціальної підготовки і високої кваліфікації робітника і т.д.

На підставі вище викладеного, представляє науковий і практичний інтерес поєднати процеси цементації і сульфидування в один, спрямований на загальне підвищення якісних параметрів поверхневого шару деталей пар тертя, який здійснюється методом ЕЛЛ.

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – підвищення якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування.

**Методика дослідження.** Для дослідження використовували зразки зі сталі 20 (ГОСТ 1050-88) розміром 15x15x8 мм, на які наносили сірчану мазь і проводили цементацію графітовим електродом на установці моделі «Елітрон-52А» з енергією розряду:  $W_p=0,13; 0,55$  і 3,4 Дж.

Металографічний аналіз покриттів проводили за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, а дюрOMETричні дослідження – на приладі ПМТ-3 за стандартними методиками.

Якісний аналіз і кількісний склад покриттів на зразках проводився із застосуванням скануючого електронного мікроскопа РЕММ-102 виробництва ВАТ "SELMI", оснащеного рентгенівським мікроаналізатором. Мікрофотографії з ділянок поверхонь досліджуваних зразків були отримані з різними рівнями збільшення в режимі формування зображення струмом вторинних електронів. Елементний склад покриття визначався по глибині від поверхні зразків з кроком сканування 15 мкм. Розрахунок вагових (масових) відсотків концентрації здійснювали методом порівняння досліджуваних зразків з еталонами. При цьому враховувалися фізичні поправки на атомний номер, поглинання випромінювання і флуоресценцію (метод трьох поправок).

Шорсткість поверхні після ЕЛЛ вивчали шляхом зняття і обробки профілограм на приладі профілограф-профілометр моделі 201.

#### **Викладення основного матеріалу.**

Проведений металографічний аналіз отриманих зразків зі сталі 20 показав, що характерний для електроіскрових покриттів білий шар після сульфоцементації не виражений (рис. 1). Чітко спостерігається дифузійна зона, товщина якої, як і слід було б очікувати, збільшується зі зростанням енергії розряду. В результаті нагрівання в міжкритичний температурний інтервал в процесі ЕЛЛ в дифузійній зоні формується ділянка неповної фазової перекристалізації.

ДюрOMETричні дослідження сульфоцементованих покриттів свідчать про те, що в поверхневому шарі утворюються дві зони: в при поверхневому шарі – зона зниженої мікротвердості, далі йде зона підвищеної мікротвердості – зміцнений шар (рис. 1 і табл. 1). Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду твердість і глибина шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару збільшуються. Очевидно, така особливість формування

сульфоцементованого шару, отриманого методом ЕІЛ, пов'язана з різною дифузією вуглецю та сірки вглиб металу.

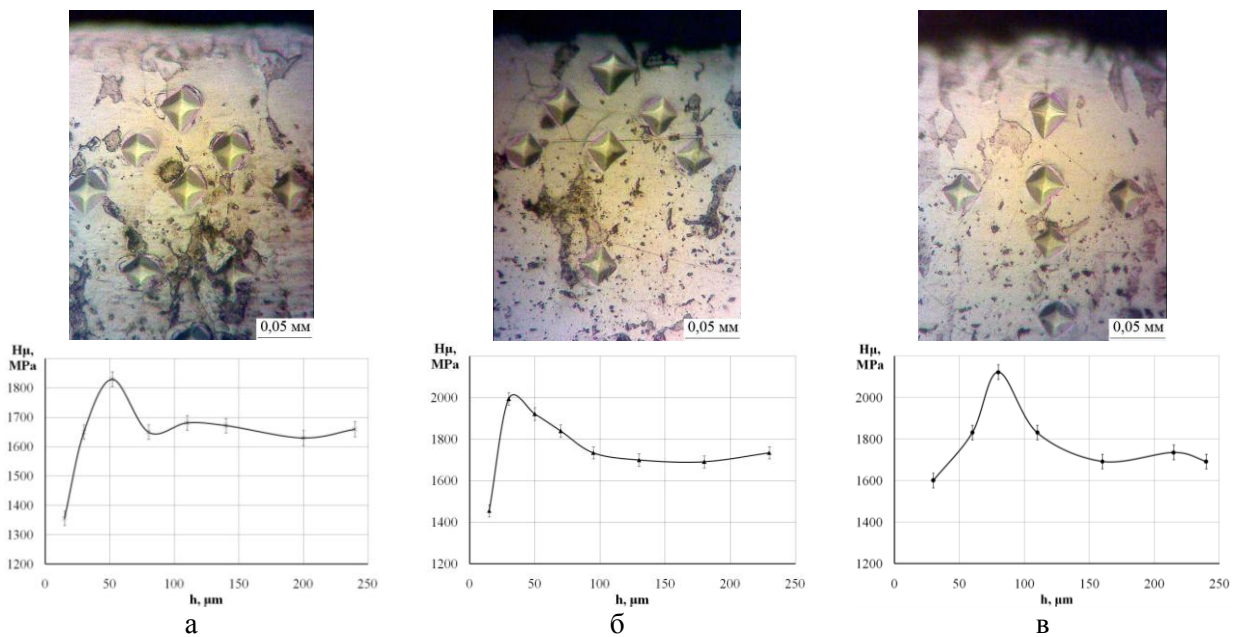


Рис. 1. Структура і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 20 після сульфоцементації методом ЕІЛ: а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 0,55$  Дж; в –  $W_p = 3,4$  Дж

Таблиця 1.

**Якісні параметри сульфоцементованих покриттів, отриманих методом ЕІЛ на сталі 20**

Енергія розряду ( $W_p$ ), Дж	Шорсткість, мкм			Шар зниженої мікротвердості		Зміцнений шар		Кількість сірки на поверхні, %	Глибина шару з підвищеним вмістом сірки, мкм
	Ra	Rz	Rmax	H $\mu$ , МПа	h, мкм	H $\mu$ , МПа	h, мкм		
0,13	1,1	2,6	7,1	1350	15	1830	30	1,01	60
0,55	1,7	4,6	13,0	1460	20	2000	40	0,65	90
3,4	2,5	3,9	15,4	1600	30	2150	50	0,45	150

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу свідчать про те (рис. 2), що сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4% (табл. 2). При ЕІЛ графітовим електродом вуглець дифундує вглиб металу і на відстані 30-50 мкм від поверхні формується зміцнений шар з мікротвердістю близько 2000 МПа (табл. 1). Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду від 0,13 до 3,4 Дж, а також характерних точках спостерігається зменшення кількості сірки, що, мабуть, пов'язано з вигоранням сірки при протіканні імпульсного розряду в процесі ЕІЛ [10].

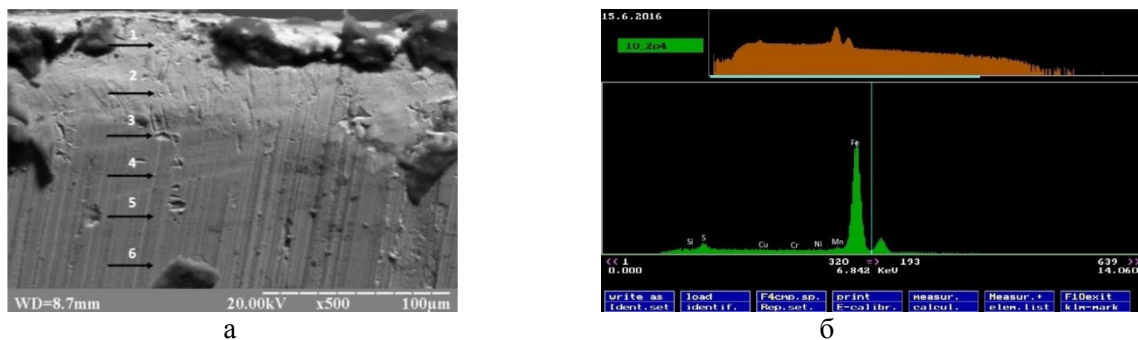


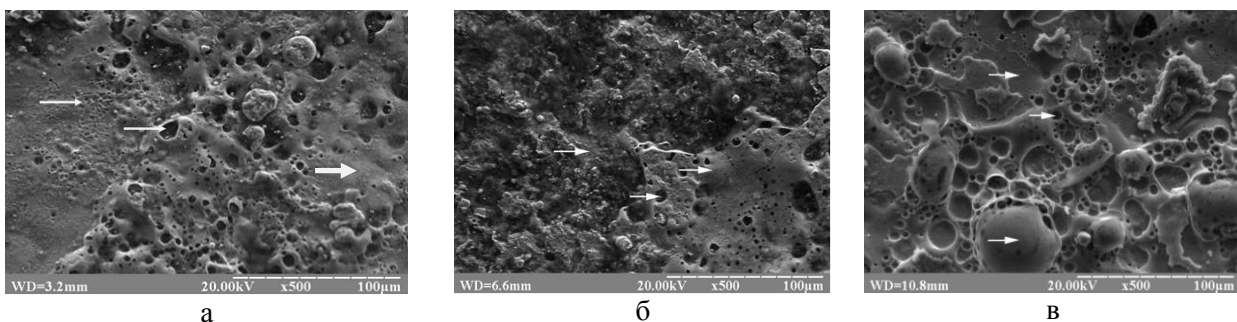
Рис. 2. Результати електронномікроскопічних досліджень покриттів після сульфоцементації методом ЕІЛ при  $W_p = 0,13$  Дж: а – фото торця зразка і точок, в яких визначено хімічний склад покриття по глибині (табл. 2); б – спектр сульфоцементованої поверхні в точці

Таблиця 2.

**Хімічний склад поверхневого шару сталі 20 після сульфоцементації методом ЕІЛ**

Досліджувана точка поверхні (рис. 2, а)	Елементи, %						
	S	Cu	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
$W_p = 0,13$ Дж							
1	0,78	0,21	0,23	0,21	0,62	0,23	97,72
2	0,58	0,19	0,20	0,18	0,59	0,22	98,04
3	0,17	0,21	0,19	0,16	0,62	0,20	98,45
4	0,05	0,22	0,11	0,19	0,61	0,19	98,63
5	0,03	0,18	0,24	0,23	0,59	0,24	98,49
6	0,02	0,20	0,23	0,16	0,63	0,23	98,53
$W_p = 0,55$ Дж							
1	0,54	0,23	0,21	0,21	0,57	0,24	98,00
2	0,41	0,19	0,23	0,19	0,59	0,22	98,17
3	0,25	0,16	0,19	0,23	0,61	0,20	98,36
4	0,12	0,21	0,16	0,21	0,54	0,23	98,53
5	0,08	0,18	0,23	0,16	0,53	0,24	98,58
6	0,05	0,24	0,21	0,25	0,52	0,17	98,56
7	0,03	0,22	0,24	0,19	0,58	0,24	98,50
$W_p = 3,4$ Дж							
1	0,47	0,22	0,24	0,21	0,56	0,23	98,07
2	0,39	0,19	0,23	0,19	0,59	0,22	98,17
3	0,28	0,17	0,18	0,23	0,51	0,20	98,43
4	0,18	0,22	0,17	0,21	0,55	0,23	98,44
5	0,12	0,19	0,24	0,15	0,55	0,23	98,52
6	0,08	0,24	0,21	0,25	0,52	0,17	98,56
7	0,08	0,25	0,23	0,19	0,56	0,23	98,46
8	0,07	0,23	0,20	0,20	0,53	0,25	98,52
9	0,06	0,25	0,21	0,26	0,50	0,20	98,52
10	0,05	0,19	0,20	0,16	0,55	0,23	98,55
11	0,03	0,20	0,19	0,14	0,40	0,23	98,81

На рис. 3 показані топографії різних ділянок поверхневих шарів при сульфоцементації сталі 20, сформованих, відповідно, з енергією розряду  $W_p = 0,13, 0,55$  і  $3,4$  Дж. Дослідження показали, що вони мають ряд загальних закономірностей: на поверхні утворюються виступи і западини, які характеризуються приблизно правильною округлістю. Однак їх дисперсність зменшується з ростом енергії розряду.



**Рис. 3. Топографії ділянок поверхні сталі 20 після сульфоцементації методом ЕІЛ:**  
**а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 0,55$  Дж; в –  $W_p = 3,4$  Дж**

На рис. 4 представлені профілограми поверхневих шарів, отриманих при сульфоцементації методом ЕІЛ з  $W_p = 0,13; 0,55$  і  $3,4$  Дж. Як і слід було б очікувати, зі збільшенням енергії розряду, шорсткість поверхні збільшується (табл. 1).

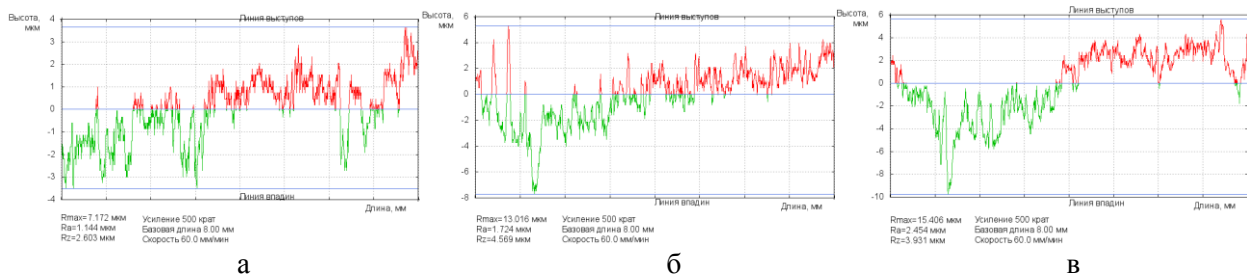


Рис. 4. Профілограми поверхневих шарів, отриманих при сульфоцементатії методом ЕІЛ:  
 а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 0,55$  Дж; в –  $W_p = 3,4$  Дж

**Висновки.** Таким чином, проведений аналіз якості поверхневих шарів після сульфоцементатії методом електроіскрового легування. Металографічні дослідження показали, що характерний для електроіскрових покриттів білий шар не виражений. Поверхневий шар складається з дифузійної зони, товщина якої збільшується зі зростанням енергії розряду, і основного металу. ДюрOMETричні дослідження сульфоцементованих покриттів свідчать про те, що в поверхневому шарі утворюються дві зони: зона зниженої мікротвердості, що, за даними мікрорентгеноспектрального аналізу, насичена сіркою, і зона підвищеної мікротвердості ( $H_c \sim 2150$  МПа) – зміцнений шар, в який дифундує переважно вуглець. Зі збільшенням енергії розряду твердість і глибина шару зниженої мікротвердості і зміцненого шару збільшуються. Сірка накопичується в поверхні металу на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4%. Для практичного застосування можна рекомендувати процес сульфоцементатії методом ЕІЛ, використовуючи режими (енергію розряду в межах  $W_p = 0,55-3,4$  Дж), які забезпечують формування сульфідного шару товщиною до 30 мкм, мікротвердістю 1460-1600 МПа, зміцненого шару з мікротвердістю до 2150 МПа, шорсткістю ( $R_a$ ) біля 2 мкм і суцільністю шару 95-100%.

#### Список використаних джерел:

1. Машков Ю.К. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, С.Н. Поворознюк, П.В. Орлов. – М.: Наука, 2000. – 280 с.
2. Аверьянова И.О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие. / И.О. Аверьянова, В.В. Клепиков. – М.: ФОРУМ, 2008. – 304 с.
3. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
4. Абрамчук А.П. Трение и износ покрытий, полученных электронным упрочнением поверхности сплава АЛ-25 тугоплавкими соединениями / А.П. Абрамчук, Г.А. Бовкун, В.В. Михайлов // Электронная обработка материалов. – 1989. – №1. – С. 17-20.
5. Марчук В.С. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В.С. Марчук, Б.А. Ляшенко, М.В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – №2 (61). – С. 80 – 87.
6. Коротаев Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электронным легированием: монография / Д.Н. Коротаев. – Омск: СибАДИ, 2009. – 255 с.
7. Ионно-лучевые покрытия на основе хрома с добавкой  $MoS_2$  / М.А. Андреев, Л.В. Маркова, А.Н. Мойсейчик, В.В. Коледа // ПОЛИКОМТРИБ-2011: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель: ИММС НАНБ, 2011. – С. 32-33.
8. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Под общей редакцией Н.Е. Денисовой. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2006. – 246 с.
9. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявлено 05.10.2006; Опубликовано 10.04.2008, Бюл. № 31. с. 3.
10. Патент України на корисну модель UA 119318 U МПК (2017.01) В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006.01). Спосіб сульфоцементатії сталевих деталей / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Білоус А.В., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О.М. – № u201701847; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017. – Бюл. № 18/2017.

#### Рецензенти:

**Тарельник В.Б.**, завідувач кафедри технічного сервісу, доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет.

**Марченко С.В.**, доцент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2019