

Корисна модель належить до області електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроіскрового (ЕІЛ) або електроерозійного легування (ЕЕЛ) поверхонь сталевих деталей алюмінієм (алітування), сіркою (сульфидування) та вуглецем (цементация). Вона може застосовуватися для обробки термооброблених сталевих деталей з метою підвищення твердості та зносостійкості поверхні, запобігання схоплюванню при терті, а також поліпшення опору атмосферній корозії. В результаті такої обробки поверхня сталі набуває високої окислювальної стійкості (до 850-900 °С), оскільки в покритті міститься алюміній, і під час нагрівання на оброблених деталях формується щільна плівка окису алюмінію (Al_2O_3), яка ефективно захищає метал від окислення. Твердість алюмінієвмісного шару на поверхні становить близько 500 HV, що забезпечує високу зносостійкість, показник якої перевищує можливості кожного з наведених нижче відомих способів.

Відомий спосіб сульфидування, який представляє собою термохімічний процес обробки виробів із залізобуглецевих сплавів для збагачення їх поверхневих шарів сіркою. У результаті на поверхні деталей утворюється плівка сульфідів, яка підвищує поверхневу активність металу, сприяє змочуванню поверхонь активними речовинами та покращує опір схоплюванню. Сульфідна плівка має меншу міцність, ніж основний метал, тому легко руйнується при терті і відокремлюється від основи без її пластичної деформації, запобігаючи схоплюванню тертьових поверхонь. Плівка сульфиду заліза (FeS) підвищує зносостійкість і поліпшує припрацьовуваність деталей. Феросульфідне покриття відзначається високою пористістю і здатністю вбирати значну кількість мастила, що надає матеріалу властивості самозмащування [Патент України на КМ № 119318, МПК (2017.01) B23H 1/00, B23H 9/00, C23C 8/60, опубл. 25.09.2017, бюл. № 18/2017].

Відомий спосіб цементации сталевих деталей електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ) [Патент України на винахід № 82948, МПК 23C 8/00. Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10], який має ряд переваг, зокрема: досягнення 100 % суцільності зміцнення поверхневого шару; підвищення твердості за рахунок дифузійно-гартівних процесів; можливість локального легування без захисту решти поверхні деталі; відсутність об'ємного нагрівання, що запобігає жолобленню та викривленням; простота застосування технології та можливість використання наявного обладнання; процес не вимагає спеціальної підготовки та високої кваліфікації робітника. При ЦЕІЛ товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу легування: зі збільшенням енергії розряду та тривалості процесу товщина шару зростає, але при цьому підвищується і шорсткість поверхні. Так, при легуванні середньовуглецевої сталі 40Х вуглецем (початкова шорсткість $Ra=0,5$ мкм) з продуктивністю 5 см²/хв і енергією розряду 6,8 Дж товщина шару підвищеної твердості перевищує 1,15 мм, а шорсткість поверхні становить $Ra=11,7-14,0$ мкм. До недоліків цього способу слід віднести:

- високу шорсткість поверхневого шару;
- тривалість процесу ЦЕІЛ.

Відомий також спосіб цементации сталевих деталей електроерозійним легуванням (ЦЕЕЛ), при якому як анод використовують графітовий електрод, а як катод - сталеву деталь [Патент України на винахід № 101715, МПК 23H 9/00. Опубл. 25.01.2013, бюл. № 8]. У цьому способі, з метою зниження шорсткості поверхні деталей при збереженні якості поверхневого шару (відсутність мікротріщин, наявність шару підвищеної твердості, 100 % суцільність та ін.), а також для розширення області застосування, пропонується після ЕІЛ вуглецем здійснювати поетапну обробку тим же графітовим електродом із поступовим зниженням енергії розряду на кожному етапі. До недоліків способу слід віднести:

- тривалість процесу ЦЕІЛ;
- зниження твердості поверхневого шару після кожного наступного етапу обробки.

Відомий спосіб алітування електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) алюмінієвим електродом сталевих деталей, що здійснюють при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж і продуктивності 1,0-3,0 см²/хв. Цей спосіб забезпечує формування так званого білого (алітованого) шару товщиною 70-130 мкм, з мікротвердістю 5000-7500 МПа, шорсткістю поверхні $Ra=6-9$ мкм і суцільністю 95-100 % [Патент України на КМ № 119316 МПК C23C 10/48 B23H 9/00.; опубл. 25.09.2017, бюл. № 18]. Слід зазначити, що максимальна мікротвердість поверхневого шару досягається при найбільшій енергії розряду $W_p=6,8$ Дж і становить 5000-7500 МПа на підкладках зі сталі 20 і 40. Однак цього не завжди достатньо для захисту від руйнування поверхонь сталевих деталей під дією різних видів зносу, таких як абразивний, кавітаційний або фреттинг-корозійний. Крім цього, при сухому контакті без змащення алітованої поверхні можливі схоплювання, заїдання, мікрозварювання та викиди окремих ділянок покриття.

Найближчим аналогом є відомий спосіб сульфидоцементации електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) графітовим електродом сталевих деталей при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж і продуктивності 1,0-3,0 см²/хв, при якому перед ЕЕЛ графітовим електродом на поверхню деталі, що підлягає обробці, наносять консистентну речовину, яка містить сірку і алюмінієву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес ЕЕЛ графітовим електродом [Патент України на КМ № 130866 МПК B23H 1/00 B23H 9/00 C23C 10/48 C23C 8/60, опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24].

Слід зазначити, що при цьому способі обробки максимальна мікротвердість, товщина та суцільність поверхневого шару досягаються при найменшій енергії розряду $W_p=0,52$ Дж і становлять відповідно 9300-9500 МПа, 150-180 мкм та 90 % на підкладках зі сталі 20 і 40. Проте цього недостатньо для повного захисту поверхонь сталевих деталей від руйнування під дією різних видів зносу, зокрема абразивного, кавітаційного, фреттинг-корозійного та інших.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення способу формування багатокомпонентних зносостійких покриттів на сталевих деталях електроіскровим легуванням, який усуває зазначені вище недоліки та забезпечує підвищення твердості, товщини, суцільності і зносостійкості деталей, запобігає схопленню при терті і покращує опір атмосферній корозії.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі формування багатокомпонентних зносостійких покриттів на сталевих деталях електроіскровим легуванням, який полягає в нанесенні на поверхню сталевих деталей першої консистентної речовини, що містить сірку та алюмінієву пудру, після чого без очікування висихання консистентної речовини проводять електроіскрове легуванням (ЕІЛ) графітовим електродом сталевих деталей при енергії розряду $W_p=0,52-6,8$ Дж та продуктивності 1,0-3,0 см²/хв, згідно з корисною моделлю, після першого легування виконують наступне легування графітовим електродом, перед яким наносять другу консистентну речовину, що містить 90 % алюмінієвої пудри та 10 % вазеліну.

Також у способі першу консистентну речовину, що містить алюмінієву пудру та сірку, наносять одноразово, після чого виконують процес ЕІЛ графітовим електродом не менше двох раз, при цьому перед кожним наступним легуванням на поверхню деталі наносять другу консистентну речовину, що містить 90 % алюмінієвої пудри та 10 % вазеліну.

Таким чином, у процесі одночасно здійснюються алітування, сульфидування та цементация, в результаті чого формується багатокомпонентне покриття, властивості якого визначаються сукупною дією зазначених процесів, що забезпечує досягнення поставленої технічної задачі.

Приклад конкретного виконання способу.

Для ілюстрації виконання способу представлені зображення, де:

на фіг. 1 представлені характерні особливості структури поверхневого шару при проведенні даного процесу;

на фіг. 2; фіг. 3 і фіг. 4 показані мікроструктури поверхневого шару, сформованого ЕІЛ графітовим електродом з енергією розряду W_p , відповідно, 6,8; 2,6 і 0,52 Дж на зразку зі сталі 20;

на фіг. 5 представлено графік розподілу мікротвердості в поверхневому шарі покриттів (фіг. 2; фіг. 3 і фіг. 4).

Для визначення впливу енергетичних параметрів обладнання ЕІЛ на якісні характеристики покриттів виготовляли зразки зі сталі 20 та 40 розміром 15×15×8 мм. На поверхню зразків наносили консистентну речовину у вигляді пасти, що складалася із сірчаної мазі з вмістом сірки 33,3 % та алюмінієвої пудри марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Максимальний вміст пудри становив 56 %, оскільки подальше його збільшення знижувало адгезію до оброблюваної поверхні. Після цього, не чекаючи висихання консистентної речовини, здійснювали процес ЕІЛ графітовим електродом на установці моделі "Елітрон-52А" з використанням різних режимів. Кожному режиму ЕІЛ відповідали певна енергія розряду та продуктивність, яка визначалася площею сформованого покриття за одиницю часу (табл. 1).

Таблиця 1

Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду (W_p), Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, см ² /хв	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

Енергію розряду визначали залежно від заданої шорсткості і суцільності одержуваного поверхневого шару, використовуючи рівняння (1) і (2) прогнозування шорсткості і суцільності.

Кожного наступного разу знижують енергію розряду, яку визначають залежно від заданої шорсткості та суцільності поверхневого шару, використовуючи рівняння прогнозування шорсткості поверхні:

$$W_p = \frac{E_{\Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{\max}}{\Delta m Ra_x}} ; (1)$$

де ΔRa_x - задана шорсткість поверхневого шару;

$\Delta Ra_{\max}$ - максимальна шорсткість поверхневого шару;

$E_{\Delta Ra}$ - енергія активації процесу формування зміцненого шару;

W_p - енергія розряду, при якій забезпечується необхідна шорсткість зміцненого шару.

Рівняння прогнозування суцільності шару:

$$W_p = \frac{E_{\Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{\max}}{\Delta S_x}} ; (2)$$

де ΔS_x - задана суцільність поверхневого шару;

$\Delta S_{\max}$ - максимальна суцільність поверхневого шару;

$E_{\Delta S}$ - енергія активації процесу формування зміцненого шару;

W_p - енергія розряду, при якій забезпечується необхідна суцільність зміцненого шару.

Перед кожною наступною обробкою графітовим електродом на сформовану поверхню наносили консистентну речовину, що складалася з 90 % алюмінієвої пудри і 10 % вазеліну.

Слід зазначити, що зниження продуктивності ЕІЛ супроводжується погіршенням якісних характеристик поверхневого шару, зокрема появою прижогів та, головне, руйнуванням сформованого шару, що особливо помітно при використанні більш "грубих" режимів за енергії розряду $W_p > 1$ Дж. Водночас підвищення продуктивності призводить до зменшення суцільності покриття. Для дослідження впливу вуглецю на властивості сформованого шару легування з використанням консистентної речовини наведеного вище складу здійснювали електродом з графіту марки ЭГ-4.

Металографічний аналіз покриттів виконували з використанням оптичного мікроскопа МИМ-7, а дюраметричні дослідження проводили на приладі ПМТ-3. Шорсткість поверхні після ЕІЛ визначали за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 виробництва заводу "Калібр" шляхом зняття та подальшої обробки профілограм. Для дослідження розподілу сірки по глибині шару застосовували локальний мікрорентгеноспектральний аналіз, заснований на реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання, збудженого електронним пучком хімічних елементів, присутніх у мікрооб'ємах. Дослідження проводили на електронному мікроскопі ISIS 300 Oxford Instruments, оснащеному рентгеноспектральним мікроаналізатором.

За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що у поверхневому шарі спостерігається утворення окремих лунок (кратерів) глибиною до 150 мкм. На фіг. 1 на зразку сталі 20 в області кратера розрізняються три зони. Перша зона (поз. 1), зона оплавлення, що погано піддається травленню, має дрібногочасту мартенситну структуру. Друга зона (поз. 2) є перехідною, вона прилягає до першої і складається з зерен складної форми. Третя зона (поз. 3), зона вихідного металу, прилягає до перших двох і має вихідну структуру.

За результатами досліджень на фіг. 2, фіг. 3 та фіг. 4 наведено мікроструктури поверхневого шару, отримані ЕІЛ графітовим електродом за енергії розряду W_p , відповідно, 0,52; 2,6 та 6,8 Дж на зразку зі сталі 20. При цьому зразок попередньо був покритий консистентною речовиною, що містила 33,3 % сірки та 56 % алюмінієвої пудри, а перед кожною наступною обробкою графітовим електродом на сформовану поверхню наносили консистентну речовину, яка складалася з 90 % алюмінієвої пудри та 10 % вазеліну.

Характерною особливістю структури є висока суцільність (100 % для всіх покриттів) та значна товщина "білого" шару, яка становить, відповідно, 10 200; 10 150 та 10 100 мкм для зразків, наведених на фіг. 2, фіг. 3 і фіг. 4. Для всіх покриттів мікротвердість є максимальною на поверхні та поступово знижується зі збільшенням відстані від поверхні, досягаючи рівня мікротвердості основи (1700 МПа) на відстані близько 170; 210 і 240 мкм, відповідно.

Таким чином, за результатами досліджень поверхневого шару зразка зі сталі 20 після формування багатокомпонентного покриття (S-Al-C) при енергії розряду $W_p = 6,8$ Дж встановлено, що суцільність покриття становить 100 %, товщина шару досягає 170 мкм, а мікротвердість - 10100 МПа. Слід відзначити, що кожна наступна електроіскрова обробка покриття графітовим електродом за знижених значень енергії розряду сприяє зменшенню шорсткості поверхні та підвищенню мікротвердості покриття (табл. 2). Наявність сірки у складі консистентної речовини забезпечує процес сульфидування. У табл. 3 наведено зміну вмісту сірки залежно від відстані від поверхні при формуванні багатокомпонентного покриття на сталі 20 методом ЕІЛ графітовим електродом за енергії розряду 6,8 Дж.

Слід зазначити, що глибина проникнення сірки та її концентрація в поверхневому шарі зменшилися порівняно з відомим аналогом (див. табл. 3).

Таблиця 2

Якісні параметри поверхневих шарів сталі 20 і сталі 40 при формуванні багатокомпонентного покриття (S-Al-C) методом ЕІЛ графітовим електродом

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	

Сталь 20						
0,52	150*/240**	9300*/10200**	2,1*/1,8**	3,9*/3,5**	8,9*/7,3**	90*/100**
2,6	100/210	9200/10150	4,2/3,6	8,7/7,4	30,2/27,1	80/100
6,8	60/170	9000/10100	8,5/7,3	10,2/7,0	62,4/58,3	50/100
Поетапно 6,8 і 2,6	60/180	9000/10120	4,3/3,1	8,4/6,5	32,3/43,3	70/100
Поетапно 6,8; 2,6 і 0,52	60/170	9000/10150	2,6/1,4	4,4/2,7	11,5/5,1	80/100
Сталь 40						
0,52	180/250	9500/10380	1,9	3,8	8,7/7,6	90/100
2,6	130/2200	9300/10250	3,9	8,5	15,3/13,5	80/100
6,8	80/180	9100/10150	7,8	11,3	58,1/43,2	60/100

* - прототип (UA 130866)

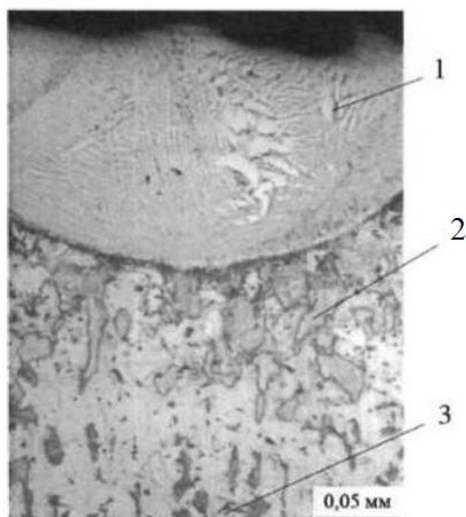
** - корисна модель, що пропонується.

Таблиця 3

Вміст сірки по глибині шару при формуванні багатокомпонентного покриття (S-Al-C) на сталі 20 методом ЕІЛ графітовим електродом з енергією розряду 6,80 Дж

Глибина вимірювання, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Наявність сірки, %	0,19	0,14	0,11	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03

Запропонована корисна модель може бути особливо ефективною для запобігання схоплюванню при сухому або напівсухому терті сталених поверхонь, зокрема в торцевих імпульсних ущільненнях роторних машин та вузлах тертя кулькової трубної арматури.



Фіг. 1

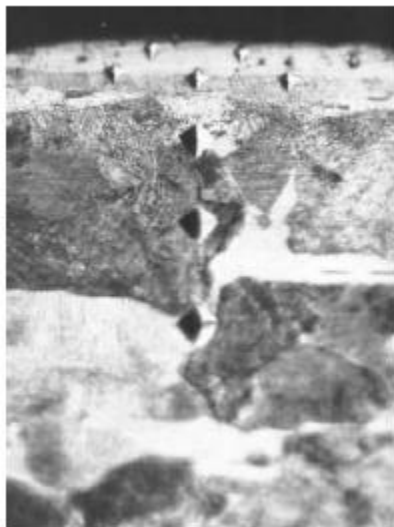


Fig. 2

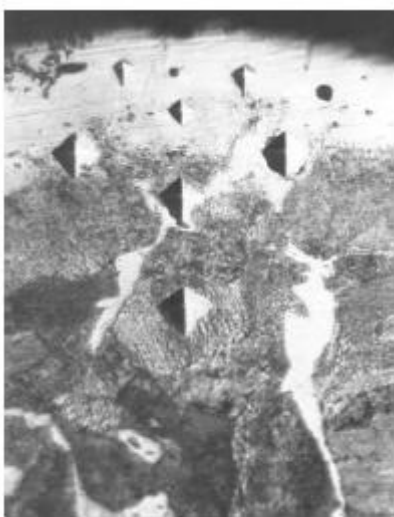
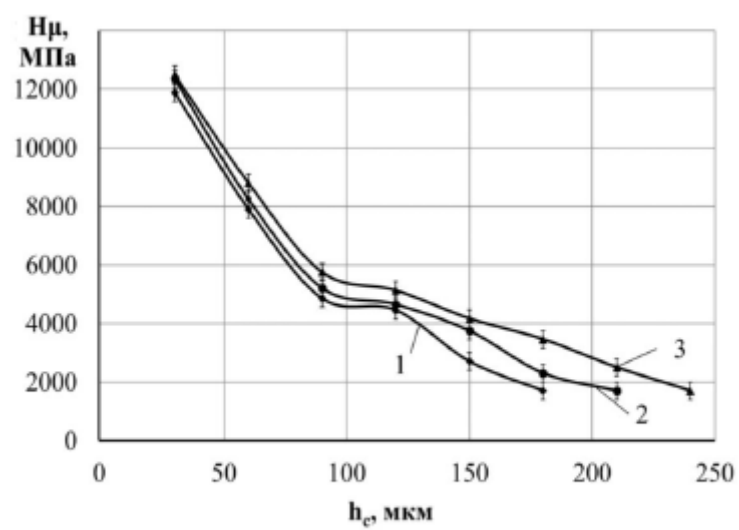


Fig. 3



Fig. 4



Фиг. 5