

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Dv, 68.35.Fx, 68.35.Gy, 81.65.Lp, 81.65.Ps

Цементация стальных деталей электроискровым легуванням

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Г. В. Кирик,
Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна

*Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*

**Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

Розглянуто спосіб цементации методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ). Досліджувалися зразки зі сталі 20. Як методи дослідження використовували металографічний, дюрOMETричний, мікрорентгеноспектральний аналізи та дослідження шорсткості поверхні. Показано, що традиційна технологія ЦЕІЛ графітовим електродом не дозволяє отримати покриття високої якості. Запропонована нова технологія ЦЕІЛ, що полягає в поетапному обробленні зразків: на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхні зразка відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю 1 см²/хв; на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносять, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні $\cong 80\%$ порошку графіту і 20% вазеліну; на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводять ЦЕІЛ сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як і на першому етапі. Порівняльний аналіз якісних параметрів шару після традиційної і запропонованої технологій ЦЕІЛ показав, що піс-

Corresponding author: Viacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*
**Sumy State University,
2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, and M. O. Mikulina, Cementation of Steel Details by Electrospark Alloying, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 5: 655–667 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.05.0655](https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655).

ля обробки поверхні за пропонованою технологією шорсткість поверхні зменшується з 8,3–9,0 мкм до 3,2–4,8 мкм, збільшується суцільність легованого шару до 100% та глибина дифузійної зони Вуглецю до 80 мкм, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина до 9932 МПа і до 230 мкм відповідно.

Ключові слова: електроіскрове легування, цементация, покриття, мікроструктура, мікротвердість, шорсткість, рентгеноспектральний аналіз.

The method of cementation by the electrospark alloying (CESA) is considered. Samples of steel 20 are investigated. Metallographic, durometric, micro-X-ray spectral analyses, and surface roughness investigation are used as the research methods. As shown, the traditional CESA technology with graphite electrode does not allow obtaining high-quality coatings. A new CESA technology is proposed. It consists in the step-by-step samples treatment: in the first stage, the CESA of the sample surface is carried out in accordance with the selected discharge energy and with a productivity of 1 cm²/min; in the second stage, the graphite powder in the form of a suspension made in the ratio of $\cong 80\%$ graphite powder and 20% petroleum jelly is applied to the surface formed in the first stage; in the third stage, without waiting for drying, the CESA of the surface formed in the second stage in the same mode and with the same performance as in the first stage is performed. Comparative analysis of the quality parameters of the layer after the traditional and proposed CESA technologies show that after surface treatment according to the proposed technology the surface roughness is decreased from 8.3–9.0 μm to 3.2–4.8 μm , the doped layer continuity is increased up to 100%, the carbon diffusion zone depth—up to 80 μm , as well as the microhardness of the ‘white’ layer and its thickness up to 9932 MPa and to 230 μm , respectively.

Key words: electrospark alloying, cementation, coatings, microstructure, microhardness, roughness, X-ray spectral analysis.

Рассмотрен способ цементации методом электроискрового легирования (ЦЭИЛ). Исследовались образцы из стали 20. В качестве методов исследования использовали металлографический, дюрометрический, микро-рентгеноспектральный анализы и исследования шероховатости поверхности. Показано, что традиционная технология ЦЭИЛ графитовым электродом не позволяет получить покрытия высокого качества. Предложена новая технология ЦЭИЛ, заключающаяся в поэтапной обработке образцов: на первом этапе осуществляется ЦЭИЛ поверхности образца в соответствии с выбранной энергией разряда и с производительностью 1 см²/мин; на втором этапе на сформированную на первом этапе поверхность детали наносят, тщательно втирая, порошок графита в виде суспензии, изготовленной в соотношении $\cong 80\%$ порошка графита и 20% вазелина; на третьем этапе, не дожидаясь высыхания, проводят ЦЭИЛ обработанной на втором этапе поверхности, причем на том же режиме и с такой же производительностью, как и на первом этапе. Сравнительный анализ качественных параметров слоя после традиционной и предлагаемой технологий ЦЭИЛ показал, что после обработки поверхности по предлагае-

мой технології шерохватість поверхності зменшується з 8,3–9,0 мкм до 3,2–4,8 мкм, збільшується площність легированого слоя до 100% і глибина дифузійної зони вуглерода до 80 мкм, а також мікротвердість «білого» слоя і його товщина до 9932 МПа і до 230 мкм відповідно.

Ключевые слова: електроіскрове легирование, цементация, покриття, мікроструктура, мікротвердість, шерохватість, рентгеноспектральний аналіз.

(Отримано 26 грудня 2019 р.; остаточн. варіант — 2 квітня 2020 р.)

1. ВСТУП

На даний час для різних галузей промисловості (електроенергетики, паливної промисловості, чорної та кольорової металургії, космічної промисловості, хімічної і нафтохімічної промисловостей, машинобудування і металообробки та ін.), сільського та комунального господарства виготовляється, відновлюється та зміцнюється величезна кількість деталей. При цьому застосовується велика кількість технологічних методів як екологічно безпечних, так і шкідливих для навколишнього середовища. Нерідко, з метою більш ефективного захисту від зносу, поверхню деталей піддають різним видам зміцнення.

Так, при відновленні дискових робочих органів, виготовлених зі сталей 65Г з твердістю робочої зони дисків після термічної обробки *HRC* 35–45 при товщині леза 0,3–0,5 мм, можуть також виконувати їхнє зміцнення, використовуючи для цього наплавлення твердими й зносостійкими матеріалами, хіміко-термічну обробку (бурвання), нанесення полімерних і композитних матеріалів, плакування зносостійкою стрічкою, зміцнення накаткою та ін. [1]. Ріжучі крайки дисків можуть бути також зміцнені лазерно-термічною обробкою на ширину 15–20 мм і на глибину 0,5–1,5 мм [2].

Таким чином, незважаючи на наявність ряду відомих способів зміцнення, відновлення й заміни ділянок поверхонь деталей, що зношуються, проблема не втратила своєї актуальності.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ДОСЯГНЕНЬ

Розробка і впровадження ефективних технологій поверхневого зміцнення обумовлені, з одного боку, необхідністю економії дорогих легувальних елементів, а з іншого, посиленням умов експлуатації деталей [3]. Одним із способів вирішення цього завдання є застосування технологій, які використовують для обробки матеріалу концентровані потоки енергії (КПЕ). У нерівноважних умовах нагрівання та охолодження при обробці КПЕ відбувається формуван-

ня принципово іншої, ніж при традиційних методах термічного і механічного впливу, структури поверхневого шару. Перспективним методом поверхневого зміцнення за допомогою КПЕ є електроіскрове леґування (ЕІЛ).

Необхідно відзначити, що технологія ЕІЛ має ряд специфічних особливостей, однією з яких є те, що процес леґування може відбуватися без значного перенесення матеріалу анода на поверхню катода і практично не призводить до приросту матеріалу. Таким чином, відбувається дифузійне насичення поверхні деталі складовими елементами (елементом) анода, наприклад, при ЕІЛ графітовим електродом.

Метод ЕІЛ графітовим електродом базується на процесі дифузії (насиченні поверхневого шару деталі Вуглецем) і має певну схожість з різновидом хіміко-термічної обробки — цементацією.

При ЕІЛ графітовим електродом зміцнення поверхні деталі відбувається за рахунок дифузійно-гартівних процесів, які полягають у локальному насиченні її Вуглецем, при досить високій температурі (до 10000°C), з наступним швидким охолодженням до кімнатної температури.

ЕІЛ графітовим електродом можна виділити в окремий напрям, що дозволяє формувати на деталях машин поверхневі шари підвищеної зносостійкості без зміни вихідного розміру деталі.

Нами раніше в роботах [4–7] досліджувався процес цементації сталевих поверхонь, який має ряд переваг, основними з яких є: досягнення 100% суцільності зміцненого поверхневого шару; підвищення твердості поверхневого шару деталі за рахунок дифузійно-гартівних процесів; леґування можна здійснювати в певних місцях, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі; відсутність об'ємного нагрівання деталі і пов'язаних з цим жолоблень і викривлень; простота застосування технології; гнучка прив'язка до наявного обладнання; процес зміцнення не вимагає спеціальної підготовки і високої кваліфікації робітника. В даному методі використовується енергія розряду 0,036–6,8 Дж та продуктивність 1,0–0,2 см²/хв.

При цементації сталевих деталей методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу леґування (продуктивності процесу). Зі збільшенням енергії розряду і часу леґування товщина зміцненого шару збільшується. При цьому зростає і шорсткість поверхні. Так, при ЦЕІЛ середньовуглецевої леґованої сталі 40Х ($R_a = 0,5$ мкм) з продуктивністю 0,2 см²/хв при енергії розряду 6,8 Дж товщина шару підвищеної твердості становить понад 1,15 мм. Шорсткість R_a поверхні при цьому дорівнює 11,7–14,0 мкм.

Процес цементації методом ЕІЛ — не нова технологія поверхневого зміцнення. Відома досить велика кількість робіт, присвячених проблемі вивчення фазового складу, структури, технологічних особливостей проведення цього виду обробки [8–11].

В [12] встановлено, що при ЕІЛ графітом стопів Заліза формується зміцнений шар, що поєднує в'язкий аустеніт і твердий карбід. Висока швидкість охолодження призводить до формування фазового складу згідно метастабільної діаграми з утворенням карбідів та інших метастабільних фаз. Графіт у вільному вигляді в цьому випадку не виділяється.

Застосовуючи компактні електроди металів і порошки графіту, феросиліцію або міді, можна одержати в сформованому шарі вільний графіт, який використовується як тверде мастило для підвищення експлуатаційних характеристик деталей пар тертя зі сталі, титанових і мідних стопів [13].

Дослідження механізму формування фаз при ЦЕІЛ [14] показали, що процес утворення цементитної фази (Fe_3C) в поверхневому шарі сталевих зразків відбувається через етапи утворення рідкої фази, її насичення йонами Вуглецю і Азоту, наступної швидкісної кристалізації з утворенням залишкового аустеніту і нітриду заліза (Fe_4N). Для підвищення зносо- і корозійної стійкості мідних деталей у ряді хімічних середовищ їх обробляли методом ЕІЛ алюмінієвим, а потім графітовим електродами [15].

У електроіскрових технологіях графіт також використовують для зменшення шорсткості поверхонь, сформованих попередньо електроіскровою обробкою іншими електродними матеріалами (мідь, срібло, нікель, титан) [16].

В [17] пропонується спосіб ЦЕІЛ, який використовують для зниження шорсткості поверхні деталей машин і, отже, для розширення області його застосування. Даний спосіб полягає в тому, що ЦЕІЛ проводять поетапно, знижуючи на кожному етапі енергію розряду. Незважаючи на переваги, властиві даному методу поверхневого оброблення, цей спосіб має ряд недоліків: зниження в результаті відпалу міцнісних властивостей, мікротвердості та товщини зміцненого поверхневого шару при поетапному впливі на нього електричного розряду при ЦЕІЛ; значна тривалість процесу при поетапній ЦЕІЛ, що використовується для зниження шорсткості.

Таким чином, виникає необхідність в подальшому вивченні методу ЦЕІЛ.

Метою даної роботи є підвищення якості поверхневих шарів сталевих деталей (шорсткості, товщини цементованого шару, мікротвердості і суцільності) шляхом вдосконалення способу цементації методом ЕІЛ за рахунок спільного застосування при легуванні компактного графітового електрода-інструменту і порошку графіту.

3. МЕТОДИКА

ЦЕІЛ виконувалося на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А», що забезпечує енергію розряду в діапазоні 0,1–6,8 Дж.

Для досліджень використовували зразки зі сталі 20 розміром $15 \times 15 \times 8$ мм³ після шліфування ($R_a = 0,5$ мкм). Використовували дві серії зразків.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією — на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом [18].

У другій серії зразки обробляли поетапно:

– на першому етапі здійснювали ЦЕІЛ поверхні зразка компактним електродом-інструментом відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2/\text{хв}$;

– на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні $\cong 80\%$ порошку графіту і 20% вазеліну. При збільшенні вмісту порошку графіту знижується його змочування вазеліном (прилипання) і утримування його на поверхні зразка;

– на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводили ЦЕІЛ компактним електродом-інструментом сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як на першому етапі.

При ЦЕІЛ зразків використовували графітові електроди марки ЕГ-4 ОСТ 229-83. Процес ЦЕІЛ проводили при різних енергіях розряду з продуктивністю $1 \text{ см}^2/\text{хв}$.

Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі «Неофот-2», дюрOMETричні — на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної пірамідки під навантаженням $0,05 \text{ Н}$. Шорсткість поверхні визначали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр».

Розподіл елементів (Вуглецю і Заліза) у поверхневому шарі визначали на скануючому електронному мікроскопі SEO-SEM Inspect S50-B з енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc).

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рисунку 1 зображені мікроструктури (*a–e*) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (*z*) зразків сталі 20 першої серії після ЦЕІЛ з $W_p = 0,9, 2,6$ і $4,6$ Дж. Параметри якості поверхневого шару зведені до табл. 1.

Проведений металографічний аналіз показав, що мікроструктури після ЦЕІЛ складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не травиться у реактиві, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою, що відповідає сталі 20. Необхідно відзначити, що зі збільшенням енергії розряду товщина і суцільність «білого» шару збільшуються (табл. 1).

Результати дюрOMETричних досліджень свідчать, що максимальна мікротвердість у 8492 МПа спостерігається на зразках після ЦЕІЛ, оброблених при енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж.

Порівнюючи вплив традиційної та досліджуваної технологій ЦЕІЛ на якісні параметри поверхневого шару, необхідно відзначити, що після обробки поверхні за пропонованою технологією ЦЕІЛ зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ

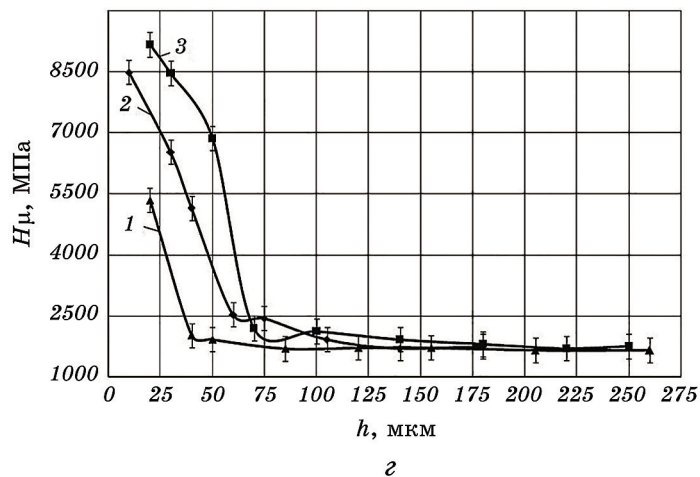
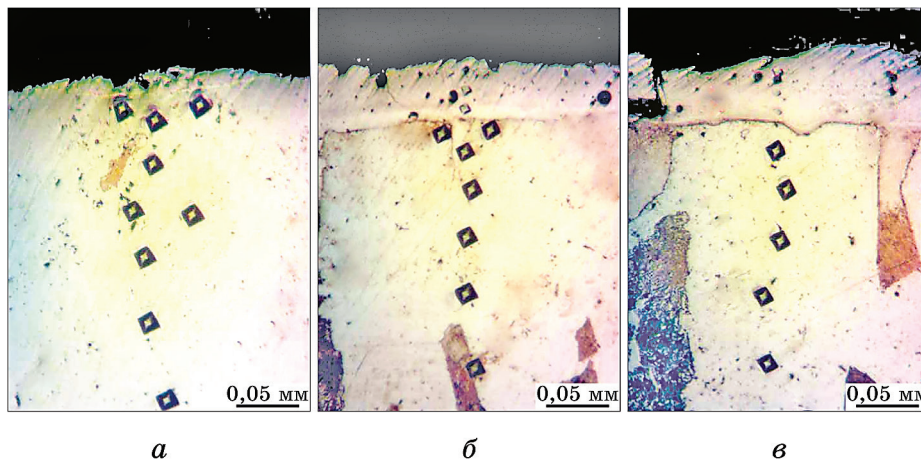


Рис. 1. Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (з) зразка сталі 20 першої серії після ЦЕІЛ: а — $W_p = 0,9$ Дж; б — $W_p = 2,6$ Дж; в — $W_p = 4,6$ Дж; на графіку (з): 1 — $W_p = 0,9$ Дж; 2 — $W_p = 2,6$ Дж; 3 — $W_p = 4,6$ Дж.

Fig. 1. Microstructures (a–v) and distribution of microhardness (z) of steel sample 20 of the first series after CESA: a — $W_p = 0.9$ J; б — $W_p = 2.6$ J; в — $W_p = 4.6$ J; on the graph (z): 1 — $W_p = 0.9$ J; 2 — $W_p = 2.6$ J; 3 — $W_p = 4.6$ J.

при $W_p = 4,6$ Дж шорсткість поверхні складає $R_a = 8,3-9,0$ мкм, а після запропонованої — $R_a = 3,2-4,8$ мкм.

Відомо [19], що при проходженні між електродами одиничного електричного імпульсу на поверхні катода (зразка) утворюється лунка з краями, дещо піднятими над первинною поверхнею металу. Розміри лунки і кількість перенесеного матеріалу в основному залежать від електроерозійної стійкості матеріалу електродів та енергії одиничного імпульсу.

На підставі викладеного можна схематично, але з великим ступенем вірогідності, описати процес утворення покриття на оброблюваній поверхні при іскровому електричному розряді. Спочатку оброблювана поверхня покривається лунками. При цьому кожний наступний розряд проходить через край лунки (найбільш виступаючу частину поверхні), так як контактуюча площа легуючого електрода завжди перевищує діаметр утвореної лунки. Усі наступні електричні імпульси попадають на вже оброблену поверхню, викликаючи значно менший виплиск металу з катода.

Сутність процесу не змінюється і тоді, коли матеріал аноду не утворює покриття, наприклад коли анодом є графіт. В цьому випадку дифузія матеріалів досить велика і також відбувається суттєва зміна вихідних фізико-хімічних властивостей оброблюваної поверхні [19].

Таким чином, при традиційному способі, при використанні будь-якого режиму, на самому початку процесу ЦЕІЛ на оброблюваній поверхні зразка (деталі) підвищується шорсткість і при цьому кож-

ТАБЛИЦЯ 1. Зведена таблиця параметрів якості поверхні зразків сталі 20 після ЦЕІЛ.

TABLE 1. Summary table of surface quality parameters for samples of steel 20 after CESA.

Енергія розряду W_p , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Суцільність «білого» шару, %	Шорсткість поверхні R_a , мкм
ЦЕІЛ традиційним способом (перша серія)				
0,9	15–30	5347	50–60	0,8–0,9
2,6	30–60	9168	70–80	5,1–6,7
4,6	25–60	8492	70–80	8,3–9,0
ЦЕІЛ запропонованим способом (друга серія)				
0,9	50–70	9932		0,9–1,0
2,6	80–100	10796	100	2,8–3,7
4,6	100–230	10796		3,2–4,8

ний наступний розряд проходить через найбільш виступаючу частину поверхні, а поверхня між виступами не піддається легуванню Вуглецем. Звідси невисока суцільність, глибина дифузії Вуглецю і зони підвищеної твердості (табл. 1).

Інша картина спостерігається при використанні пропонованого способу. На другому етапі западини між виступами, що визначають шорсткість, заповнюються порошком графіту і вже на третьому

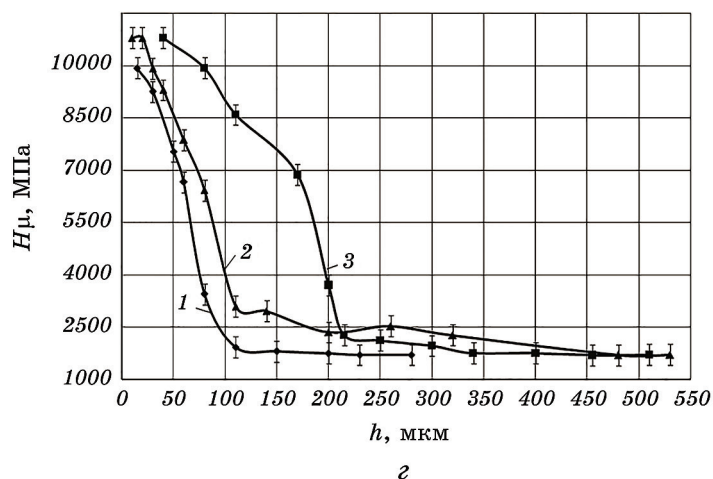
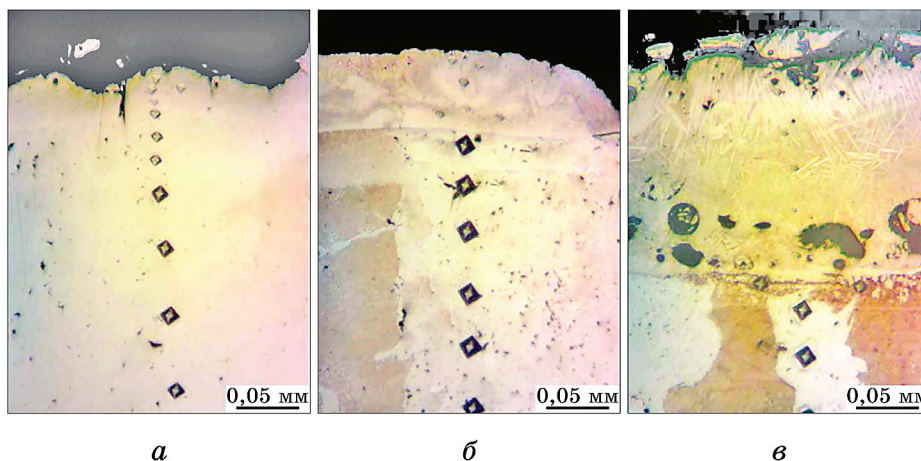


Рис. 2. Мікроструктури (а-в) і розподіл мікротвердості (z) зразка сталі 20 другої серії після ЦЕІЛ: а — $W_p = 0,9$ Дж; б — $W_p = 2,6$ Дж; в — $W_p = 4,6$ Дж; на графіку (z): 1 — $W_p = 0,9$ Дж; 2 — $W_p = 2,6$ Дж; 3 — $W_p = 4,6$ Дж.

Fig. 2. Microstructures (a-v) and distribution of microhardness (z) of steel sample 20 of the second series after CESA: a— $W_p = 0.9$ J; б— $W_p = 2.6$ J; в— $W_p = 4.6$ J; on the graph (z): 1— $W_p = 0.9$ J; 2— $W_p = 2.6$ J; 3— $W_p = 4.6$ J.

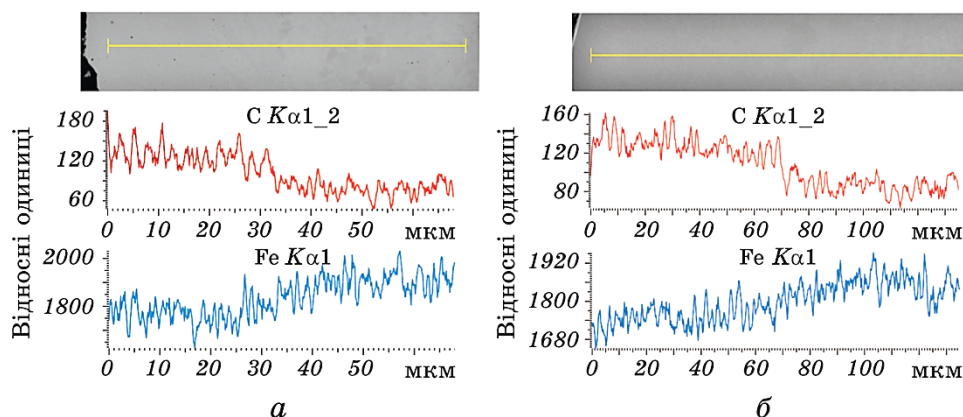


Рис. 3. Розподіл елементів в поверхневому шарі зразків зі сталі 20 після ЦЕІЛ при енергії розряду $W_p = 0,9$ Дж: *а* — зразок першої серії; *б* — зразок другої серії.

Fig. 3. Distribution of elements in the surface layer of steel 20 samples after CESA at discharge energy $W_p = 0.9$ J: *a*—sample of the first series; *b*—sample of the second series.

етапі процес ЕІЛ протікає не тільки по цих виступах, а й по поверхні з нанесеного на другому етапі порошку графіту, що збільшує щільність легованого шару до 100% (рис. 2). Крім того, повторна ЦЕІЛ на третьому етапі пропонованої технології призводить до насичення сталі Вуглецем, збільшення глибини дифузії Вуглецю порівняно з традиційною ЦЕІЛ (рис. 3) та, в умовах прискореного охолодження після ЦЕІЛ, «білий» шар має більш високу мікротвердість (9932 МПа), що зберігається на відстані до 50–70 мкм від поверхні (табл. 1).

Таким чином, слід зазначити, що метод ЕІЛ можна застосовувати як заміну екологічно небезпечних дорогих і непродуктивних способів поверхневої обробки. Порівняно з традиційними технологіями поверхневого зміцнення, наприклад, ХТО, метод має переваги: локальність, високий ступінь адгезії, виникнення невеликого теплового фону і, як наслідок, відсутність жолоблення і деформацій, простий і гнучкий технологічний процес, екологічна безпека та ін.

Завдяки вдосконаленню технології цементації методом ЕІЛ усувається низка недоліків, таких як відносно мала і нерівномірна товщина формованого шару, його поруватість та шорсткість.

5. ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літератури, присвяченої використанню цементації графітовим електродом. Показана можливість застосування

методу електроіскрового легування замість екологічно небезпечного способу хіміко-термічної обробки.

2. Експериментально апробовані два способи ЦЕІЛ: традиційна технологія, яка полягає в ЕІЛ поверхні компактним графітовим електродом-інструментом на одному режимі і з однаковою продуктивністю ЦЕІЛ, і пропонована. Сутність пропонованої технології полягає в тому, що зразки обробляються поетапно: на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхні зразка відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2/\text{хв}$; на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносять, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні $\cong 80\%$ порошку графіту і 20% вазеліну; на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводять ЦЕІЛ сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як і на першому етапі.

3. Дослідження показали, що мікроструктури після традиційної ЦЕІЛ складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не піддається хімічному травленню, дифузійна зона і основа з ферито-перлітною структурою, що відповідає сталі 20. Діюметричні дослідження свідчать, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість і товщина шару підвищеної твердості. Максимальна мікротвердість — 8492 МПа має місце після ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$.

4. Порівняльний аналіз якісних параметрів шару після традиційної і пропонованої технологій ЦЕІЛ показав, що після обробки поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ шорсткість поверхні складає $R_a = 8,3\text{--}9,0 \text{ мкм}$, а після пропонованої — $R_a = 3,2\text{--}4,8 \text{ мкм}$. При цьому збільшується суцільність легованого шару до 100% , до 80 мкм збільшується глибина дифузійної зони Вуглецю, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина до 9932 МПа і 230 мкм відповідно.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. В. Шовкопляс, *Лесотехнический журнал*, № 1: 203 (2016).
2. Е. А. Митрюшин, Ю. А. Моргунов, С. Б. Саушкин, *Металлообработка*, 42, № 2: (2010).
3. Д. Н. Коротаев, Е. В. Иванова, *Физика и химия обработки материалов*, № 6: 81 (2010).
4. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 54: 147 (2018).
5. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarel'nyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 1: 47 (2019).
6. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, V. A. Herasymenko,

- and N. S. Evtushenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 235 (2018).
7. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petrol Eng.*, **53**: 540 (2017).
 8. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol Eng.*, **53**: 266 (2017).
 9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol Eng.*, **51**: 402 (2015).
 10. А. И. Михайлюк, А. Е. Гиглевич, А. Н. Иванов, *Электронная обработка материалов*, № 4: 24 (1986).
 11. А. Д. Верхотуров, А. И. Михайлюк, И. М. Муха, Н. С. Столярова, *Электронная обработка материалов*, № 2: 13 (1988).
 12. А. И. Михайлюк, А. Е. Гитлевич, А. И. Иванов, Е. И. Фомичев, *Электронная обработка материалов*, № 4: 23 (1986).
 13. А. И. Михайлюк, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, **46(5)**: 37 (2010).
 14. В. М. Ершов, *Сборник научных трудов сотрудников Донбасского государственного технического университета*, **31**: 219 (2011).
 15. А. И. Михайлюк, В. Г. Ревенко, Н. Н. Натаров, *Физика и химия обработки материалов*, № 1: 101 (1993).
 16. А. И. Михайлюк, *Электронная обработка материалов*, **39(3)**: 21 (2003).
 17. В. С. Марцинковский, В. В. Тарельник, М. П. Братуцк, *Способ цементации сталевих деталей електроерозійним легуванням*: Патент України № 101715 (Опубл. 25.04.2013).
 18. В. С. Марцинковський, В. В. Тарельник, А. В. Білоус, *Способ цементации сталевих деталей електроерозійним легуванням*: Патент України № 82948 (Опубл. 26.05.2008).
 19. Н. И. Лазаренко, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Москва: Машиностроение: 1976).

REFERENCES

1. A. V. Shovkoplyas, *Lesotekhnicheskii Zhurnal*, No. 1: 203 (2016) (in Russian).
2. Ye. A. Mitryushin, Yu. A. Morgunov, and S. B. Saushkin, *Metalloobrabotka*, **42**, No. 2: (2010) (in Russian).
3. D. N. Korotayev and Ye. V. Ivanova, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 6: 81 (2010) (in Russian).
4. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).
5. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsinkovskyy, N. V. Tarel'nyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019).
6. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, and V. A. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 235 (2018).
7. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petrol Eng.*, **53**: 540 (2017).
8. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol Eng.*, **53**: 266 (2017).

9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol Eng*, **51**: 402 (2015).
10. A. I. Mikhaylyuk, A. Ye. Giglevich, and A. N. Ivanov, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 4: 24 (1986) (in Russian).
11. A. D. Verkhoturov, A. I. Mikhaylyuk, I. M. Mukha, and N. S. Stolyarova, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 2: 13 (1988) (in Russian).
12. A. I. Mikhaylyuk, A. Ye. Gitlevich, A. I. Ivanov, and Ye. I. Fomichev, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 4: 23 (1986) (in Russian).
13. A. I. Mikhaylyuk and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **46**(5): 37 (2010) (in Russian).
14. V. M. Yershov, *Sbornik Nauchnykh Trudov Sotrudnikov Donbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, **31**: 219 (2011) (in Russian).
15. A. I. Mikhaylyuk, V. G. Revenko, and N. N. Natarov, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No.1: 101 (1993) (in Russian).
16. A. I. Mikhaylyuk, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **39**(3): 21 (2003) (in Russian).
17. V. S. Martsynkovskii, V. B. Tarel'nyk, and M. P. Bratushchak, *Sposib Tsementatsiyi Stalevykh Detaley Elektroeroziynym Lehuванняm*: Patent of Ukraine No. 101715 (Publ. 25.04.2013) (in Ukrainian).
18. V. S. Martsynkovskii, V. B. Tarel'nyk, and A. V. Bilous, *Sposib Tsementatsiyi Stalevykh Detaley Elektroeroziynym Lehuванняm*: Patent of Ukraine No. 82948 (Publ. 26.05.2008) (in Ukrainian).
19. N. I. Lazarenko, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* (Moscow: Mashinostroenie: 1976) (in Russian).