

ОЦІНКА ЯКОСТІ АІ-С-В-ПОКРИТТІВ НА СТАЛЕВИХ ПОВЕРХНЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Гапонова О. П.¹, Мисливченко О. М.², Дудченко В. В.¹,

¹Сумський державний університет

²Інститут проблем матеріалознавства НАН України

Анотація. Розроблений новий спосіб отримання борвмісних покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ, який полягає в нанесенні на оброблювану поверхню обмазки, що складається із сірчаної мазі, алюмінієвої пудри, порошку аморфного бору, з наступним електроіскровим легуванням графітовим електродом.

Ключові слова: електроіскрове легування, мікроструктура, мікротвердість, рентгеноструктурний аналіз, мікрорентгеноспектральний аналіз, АІ-С-В-покриття.

Вступ

У процесі експлуатації виробу, як правило, найбільшому впливу піддаються поверхневі шари матеріалів. Це можуть бути агресивні середовища, висока температура, різні силові дії, наявність абразивних частинок і т. д. Для деталей, що працюють в таких умовах, застосовують різні види сталей і сплавів, і, як правило, високолеговані, що істотно ускладнює технологічні процеси виготовлення і здорожує готовий виріб. Водночас можна замінити дорогі сталі на менш леговані, і навіть на вуглецеві в разі нанесення на них спеціальних покриттів, які підвищують працездатність виробів у цих умовах. Найбільшого поширення в промисловості отримали дифузійні методи нанесення покриттів, що пов'язано з найкращою вивченістю та простотою проведення цих процесів. Однак існують альтернативні способи поверхневої обробки, які позбавлені недоліків дифузійних методів.

Аналіз публікацій

Як відомо, борування сталеві поверхні сприяє підвищенню зносостійкості в 3–50 разів порівняно з термообробкою і в 1,5–15 разів порівняно з традиційними способами хіміко-термічної обробки (ХТО) [1, 2]. Основний недолік будь-якого способу борування є крихкість поверхневого шару. Тому більшість досліджень спрямовано на пошуки шляхів отримання якісних боридних покриттів [3].

Альтернативними технологіями отримання борованих покриттів, які не мають недоліків, властивих ХТО (тривалість процесу, низька продуктивність, необхідність нагрівання всієї оброблюваної деталі, деформації

та викривлення, необхідність застосування дорогого устаткування і т.д.), є способи борування із застосуванням концентрованих потоків енергії [4–6]. Застосування локальних методів обробки поверхні, основаних на методі електроіскрового легування (ЕІЛ), дозволить отримати шари із заданими властивостями. Його переваги – це локальність, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагріву матеріалу, висока адгезія покриття з основним металом, простота автоматизації процесу, екологічна безпека й економічність [7, 8]. Метод ЕІЛ дозволяє здійснювати такі процеси ХТО, як цементація, алітування, хромування тощо. Також за умови ЕІЛ у поверхню деталі можна вводити не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор та ін., шляхом їхнього введення в рідку мікрованну, що утворюється в процесі локальних електроіскрових розрядів [9].

Нами показано, що легування елементами під час ЕІЛ можна здійснити шляхом створення спеціального технологічного середовища (СТС) без використання дорогих електродних матеріалів, скоротити час отримання покриття, підвищити продуктивність, знизити собівартість і здійснити процеси сульфидування, сульфоцементації, сульфоалітування і т.д. [10].

Мета та постановка завдання

Метою роботи є розробка способу отримання борвмісних покриттів системи АІ-С-В методом ЕІЛ шляхом нанесення на оброблювану поверхню СТС, вивчення процесів структуро- і фазоутворення поверхневих шарів залежно від енергетичних процесів ЕІЛ і матеріалу підкладки.

Оцінка якості Al-C-B-покриттів на сталевих поверхнях

Для дослідження використовували зразки зі сталі 20 і 40 (ГОСТ 1050-88) розміром 15x15x8 мм, на які наносили обмазку, що складається із сірчаної мазі, алюмінієвої пудри, порошку аморфного бору. Не чекаючи висихання, здійснювали ЕІЛ поверхонь зразків графітовим електродом на установці моделі «Елітрон-52А» з енергією розряду: 0,13, 0,55 і 4,9 Дж.

Шорсткість поверхні після обробки визначали на профілографі-профілометрі мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм. Металографічний аналіз покриттів проводили за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, а дюрOMETричні дослідження – на приладі ПМТ-3 за стандартними методиками.

Для дослідження розподілу елементів за глибиною шару використовувався сканувальний електронний мікроскоп SEO-SEM Inspect S50-B, оснащений енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc).

Рентгенографічні дослідження проводили в СоК α -випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-УМ1. Дифрактограми знімали методом покрокового сканування. Крок сканування становив 0,050, час експозиції в точці – 3 с.

Аналіз топографії поверхонь зразків після ЕІЛ показав, що загальний характер форми елементів мікронерівностей поверхонь одноманітний. Значне збільшення мікронерівностей на поверхні зразка спостерігається після ЕІЛ за умови $W_p = 4,9$ Дж, що пов'язано зі збільшенням енергетичного впливу. Значення шорсткості поверхні залежно від енергетичних параметрів обробки наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Якісні параметри Al-C-B-покриттів, отриманих методом ЕІЛ

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Зміцнений шар		
	Ra	Rz	Rmax	H μ , МПа	h, мкм	S, %
Сталь 20						
0,13	1,1	2,7	7,2	5474	20	60
0,55	2,9	4,1	16,3	10196	30	80
4,9	8,9	18,7	46,1	11345	75	95
Сталь 40						
0,13	1,2	2,9	7,4	6487	15	55
0,55	2,9	4,5	17,3	10351	20	75
4,9	9,3	19,5	48,2	12350	60	95

S, % – суцільність шару

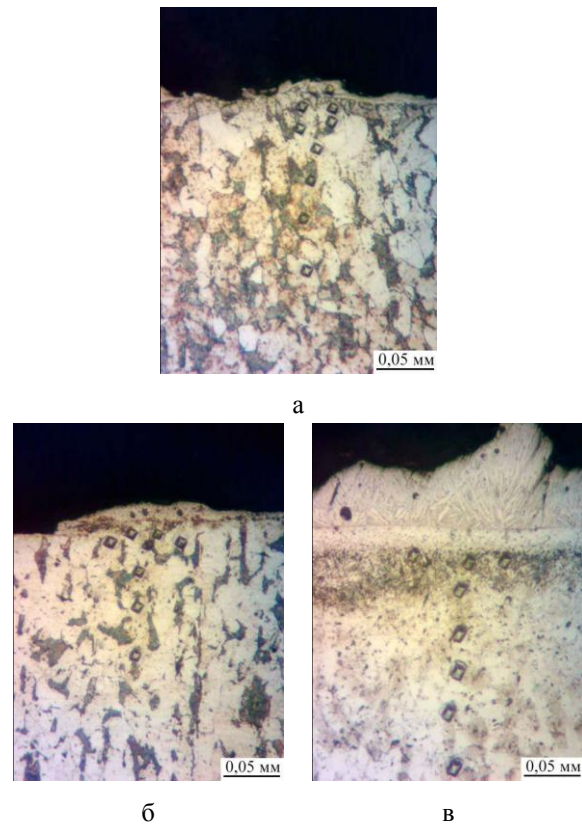


Рис. 1. Мікроструктури (а-в) Al-C-B покриттів на сталі 40: а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж

Мікроструктурний аналіз Al-C-B-покриттів на сталі 40 показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. За умови енергій розряду 0,13 і 0,55 Дж шари складаються з трьох ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона й основний метал – сталь 40 з ферито-перлітною структурою (рис. 1, 2). Зокрема величина «білого» шару для цих режимів становить 15–20 мкм.

Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їхньої структури: верхній шар із дендритною структурою (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона, що характеризується подрібненими структурними складовими й у зв'язку з цим має підвищену травимість у реактиві, а також основного металу.

ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу під час ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: якщо $W_p = 0,13$ Дж, $H\mu = 6487$ МПа, а за умови $W_p = 4,9$ Дж – 12350 МПа.

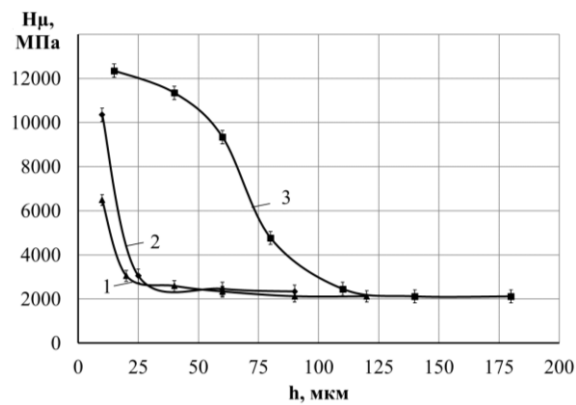


Рис. 2. Розподіл мікротвердості (H_r) Al-C-B-покриттів на сталі 40: 1 – $W_p = 0,13$ Дж; 2 – $W_p = 0,55$ Дж; 3 – $W_p = 4,9$ Дж

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що в разі енергій розряду 0,13 і 0,55 Дж фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК (рис. 3).

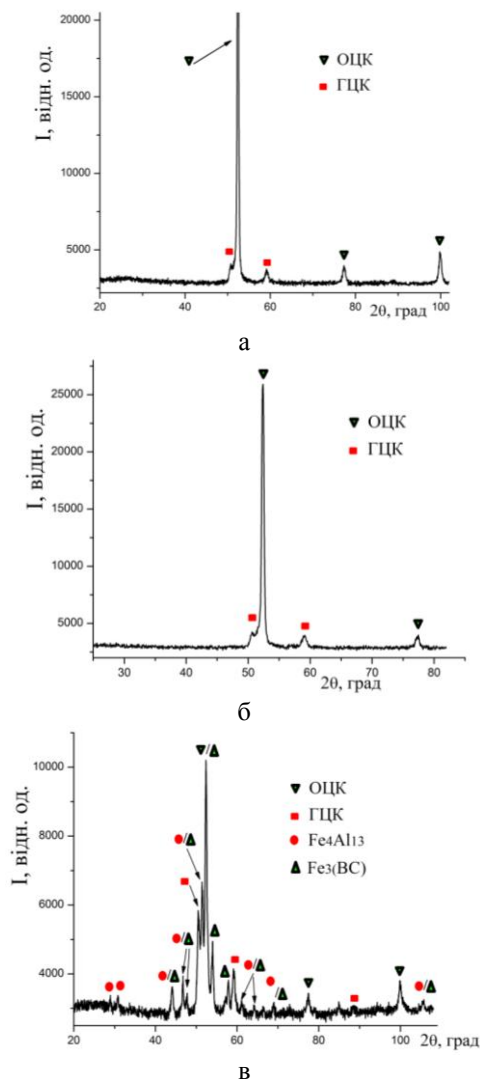


Рис. 3. Дифрактограми Al-C-B-покриттів на сталі 40: а – $W_p = 0,13$ Дж; б – $W_p = 0,55$ Дж; в – $W_p = 4,9$ Дж

Покриття, отримані за умови $W_p = 4,9$ Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК, інтерметалідів Fe_4Al_{13} і легованого цементиту $Fe_3(BC)$.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що під час електроіскрового легування відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується: за умови ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж сталі 40 дифузійна зона становить 10–15 мкм.

У випадку заміни підкладки зі сталі 40 на сталь 20 внаслідок ЕІЛ спостерігається збільшення товщини поверхнього шару за умови деякого зниження мікротвердості. Якщо $W_p = 0,13$ Дж, формуються тонкі й несуцільні шари.

Зі збільшенням енергії розряду товщина покриттів, їхня суцільність збільшуються.

Необхідно зазначити, що зі зростанням енергії розряду відбувається збільшення дифузійної зони Al, C і B: якщо $W_p = 0,13$ Дж, ця зона становить 5–7 мкм, тоді як у разі $W_p = 4,9$ Дж – 23–25 мкм. Більшою мірою вглиб від поверхні дифундує вуглець і алюміній.

Висновки

Розроблений новий спосіб отримання борвмісних покриттів системи Al-C-B методом ЕІЛ, який полягає в нанесенні на оброблювану поверхню обмазки, що складається із сірчаної мазі, алюмінієвої пудри, порошку аморфного бору, і електроіскрового легування графітовим електродом. Результати досліджень свідчать про те, що внаслідок ЕІЛ відбувається насичення поверхні сталі алюмінієм, вуглецем і бором, утворення твердих розчинів, інтерметалідів Fe_4Al_{13} і легованого цементиту $Fe_3(BC)$. У цьому разі мікротвердість шару на сталі 40 за умови $W_p = 4,9$ Дж становить 12350 МПа.

Література

1. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981. 296 с.
2. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. Москва: Металлургия, 1985. 256 с.
3. Гапонова О.П., Охріменко В.О. Структура і властивості боридних покриттів легованих міддю та хромом на інструментальних сталях. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2016. Вип. 10/3 (31). С. 78–82.

4. Тананко І.А., Левченко А.А., Гуйва Р.Т., Гуйва В.А., Ситцева Е.Ю. Лазерное борирование высокопрочного чугуна. *ФиХОМ*. 1991. № 5. С. 89–95.
5. Сафонов А.И. Особенности борирования железа и сталей с помощью непрерывного CO₂-лазера. *MuTOM*. 1998. № 1. С. 5–9.
6. Сизов И.Г., Смирнягина Н.Н., Семенов А.П. Особенности электронно-лучевого борирования сталей. *MuTOM*. 1999. № 12. С. 8–11.
7. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko Ye.V., Yevtushenko N.S., Herasymenko V.O. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40. No. 2. P. 235–254. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0235>.
8. Тарельник В.Б., Гапонова О.П. Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроіскровим легуванням. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2019. № 1 (55). С. 2–7.
9. Гапонова О.П. Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С. 24–28.
10. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Myslyvchenko O.M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41. No. 10. P. 1377–1394. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>.

References

1. Voroshnin L.G. *Mnogokomponentnye difuzionnye pokrytiya*. Minsk: Nauka i tehnika, 1981. 296 s.
2. Lahtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Himikotermicheskaya obrabotka metallov*. Moskva: Metallurgiya, 1985. 256 s.
3. Gaponova O.P., Ohrimenko V.O. Struktu-ra i vlastivosti boridnih pokryttiv legovanih middy ta hromom na instrumentalnih stalyah. *Visnik Sumського nacionalnogo agrarnogo universitetu*. 2016. Vip. 10/3 (31). S. 78–82.
4. Tananko I.A., Levchenko A.A., Gujva R.T., Gujva V.A., Sitcevaya E.Yu. Lazernoe borirovanie vysokoprochnogo chuguna. *FiHOM*. 1991. № 5. S. 89–95.
5. Safonov A.I. Osobennosti borirovaniya zheleza i stalej s pomoshyu nepreryvnogo SO₂-lazera. *MiTOM*. 1998. № 1. S. 5–9.
6. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. Osobennosti elektronno-luchevogo borirovaniya stalej. *MiTOM*. 1999. № 12. S. 8–11.
7. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko Ye.V., Yevtushenko N.S., Herasymenko V.O. The Analysis of a Structural

- State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40. No. 2. P. 235–254. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0235>.
8. Tarelnik V.B., Gaponova O.P. Pidvishennya ekspluatacijnih karakteristik i ekologichnoyi bezpeki detalej mashin ta instrumentu elektroiskrovim leguvannjam. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. 2019. № 1 (55). S. 2–7.
9. Gaponova O.P. Analiz yakosti kompleksnih sulfocementovanih pokryttiv, otrimanih metodom elektroiskrovogo leguvannya. *Naukovi notatki*. 2019. Vip. 67. S. 24–28.
10. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Myslyvchenko O.M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41. No. 10. P. 1377–1394. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>.

Гапонова Оксана Петрівна, к.т.н., доц., кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007, телефон +38 0542-64-09-49, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Мисливченко Олександр Миколайович, к.т.н., ст.н.с., відділ фізичної хімії неорганічних матеріалів, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Кржижановського 3, Київ, 03142, телефон +38 0443-90-87-51, zyagina47@gmail.com

Дудченко Віталіна Вікторівна, аспірантка, кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007, телефон +38 0542-64-09-49, v.dudchenko@crkp.sumdu.edu.ua

Quality assessment of AL-C-B coatings on steel surfaces obtained by electro spark alloying

Abstract. Problem. As a rule, during the operation of the product, the surface layers of materials are most affected. These can be parts that work in aggressive environments, at high temperatures, various force actions, the presence of abrasive particles, etc. Under such conditions, different types of steels and alloys are used, and, most commonly, it is high-alloy, which significantly complicates the manufacturing process and increases the cost of the finished product. Diffusion coating methods are the most widespread in the industry, which is due to the best study and ease of these processes. However, there are alternative methods of surface treatment, which are devoid of the disadvantages of diffusion methods. The **goal** is to develop a method of obtaining boron-containing coatings of the Al-C-B system by the electro spark alloying (ESA), applying STS to the treated

surface, to study the processes of structural and phase formation of surface layers depending on the energy processes of ESA and substrate material. **Methodology.** Samples made of steel 20 and 40 were used for the study, on which a coating consisting of their sulfur ointment, aluminum powder, amorphous boron powder was applied. Without waiting for drying, the ESA surfaces of the samples were carried out with a graphite electrode on an installation with a discharge energy of 0.13, 0.55 and 4.9 J. The surface roughness after treatment was determined on a profilograph-profilometer by removing and processing profilograms. Metallographic analysis of coatings was performed using an MIM-7 optical microscope, and durometric studies were made on the PMT-3 device according to standard methods. **Results:** the article presents the **original** method for obtaining boron-containing coatings of the Al-C-B system by the ESA method, which involves applying a coating consisting of sulfur ointment, aluminum powder, amorphous boron powder on the treated surface, followed by electric spark doping with a graphite electrode.

Key words: electric spark doping, microstructure, microhardness, X-ray diffraction analysis, micro X-ray spectral analysis, Al-C-B coating.

Gaponova Oksana Petrovna, Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, Rymkogo-Korsakova st. 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Myslyvchenko Oleksandr Mykolayovych, Ph.D., Senior Research Fellow, Department of Physical Chemistry of Inorganic Materials, Institute of Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Krzhizhanovsky str., Krzhizhanovskoho st. 3, Kyiv, 03142, phone +38 0443-90-87-51, zvyagina47@gmail.com

Dudchenko Vitalina Viktorivna, graduate student, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, Rymkogo-Korsakova st. 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, v.dudchenko@crkp.sumdu.edu.ua
