

Вдосконалення технології азотування методом електроіскрового легування

Гапонова О. П., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>

Охріменко В. О., аспірант, v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3119-8262>

Тарельник Н. В., кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри, natasha-tarelnik@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>

Мисливченко О. М.*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, zvuyagina47@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-6488>

Сумський державний університет, Суми

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

У роботі наведені дослідження, які спрямовані на розробку способів захисту деталей з конструкційних сталей на прикладі сталей 20 та 40, від зношування, за допомогою методу електроіскрового легування (ЕІЛ), шляхом нанесення на оброблювану поверхню азотистої пастоподібної суміші з наступним легуванням електродом-інструментом зі сталі відповідної до сталі оброблюваного матеріалу. Для підвищення товщини поверхневого шару та кращої адгезії покриття пропонується перед ЕІЛ електродом-інструментом зі сталі відповідної марки, формувати підшарок з алюмінію, використовуючи електрод із алюмінієвого прутка марки АТ. Проведені металографічні дослідження та визначений розподіл мікротвердості у покритті. Дослідження показали що азотовмісні покриття складаються з «білого» шару», який плавно переходить у дифузійну зону та основного металу. Отримані покриття мають найбільшу товщину «білого шару» 110-130 мкм. Результати дослідження мікротвердості отриманих азотовмісних покриттів свідчать про підвищення твердості до 9700-9910 МПа. Фазовий склад азотованих покриттів представлений легованим твердим розчином і кубічним нітридом заліза, алюміній розчиняється у нітриді та фериті. Розглянуті способи нанесення азотовмісних покриттів можуть бути застосовані для зміцнення поверхні відповідальних деталей та елементів насосного та компресорного обладнання: торцевих поверхонь кілець, для захисних втулок; штоків поршневих машин, механізмів які мають підвищене зношування поверхні виробу та ін.

Ключові слова: електроіскрове легування, мікроструктура, азотування, сталь, фазовий склад.

Для покращення поверхневих властивостей сталей часто застосовується хіміко-термічна обробка сталей. Однією із найпоширеніших технологій поверхневого зміцнення є азотування поверхонь деталей машин, які працюють в умовах зношування.

Термічна і хіміко-термічна обробка

Через створення на поверхні виробу нітридів, які у подальшому надають виробу високу поверхневу твердість ~ 1200 HV, азотування застосовується для важконавантажених деталей, які працюють як у корозійному середовищі, так і в умовах зносу, наприклад, зубці шестерні, ходові гвинти верстатів, клапани двигунів внутрішнього згорання та інші. Головними вимогами до деталей є не тільки їх висока зносостійкість, але і високі вимоги до шорсткості та якості поверхні [1, 2].

Незважаючи на переваги методу хіміко-термічної обробки, існує і ряд недоліків, серед них термічний нагрів усієї деталі, який призводить до структурних змін. Також, азотування зазвичай проводять у газовому середовищі, для чого потрібно габаритне та високовартісне обладнання. І найголовніший недолік, це значна тривалість насичення поверхні, що при виробництві впливає на ефективність і економічність процесу.

Одним із сучасних методів поверхневого зміцнення виробів є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє отримати поверхневий шар з унікальними трибологічними властивостями та не впливає на мікроструктуру основного металу (деталі), збільшити товщину зносостійкого поверхневого шару виробів. Це надає змогу замінити дорогі матеріали для виготовлення деталей на більш дешеві. Головною перевагою електроіскрового легування є простота устаткування та досить низька електроємність порівняно із хіміко-термічною обробкою [3-6].

Останніми роками набули розвитку комбіновані методи поверхневої обробки. Це поєднання двох та більше технологій для нанесення покриттів, зокрема хіміко-термічна обробка у поєднанні з ЕІЛ [7-8]. Автори роботи [7], зазначають, що дана технологія може застосовуватися для деталей, які працюють в умовах тертя. Завдяки застосуванню комбінованих методів можна досягти збільшення товщини та мікротвердості покриття [8]. Як зазначають автори, регулювати мікротвердість покриття можливо змінюючи послідовність процесу насичення поверхневого шару, що дозволить підібрати оптимальний режим для потрібного виробу.

В роботі [9] проаналізований метод отримання покриття електроіскровим легуванням у газових середовищах: аргону, водню та азоту. Легування проводилося твердосплавними електродами. Визначено, що твердість покриття при послідовному насиченні азотом та твердим сплавом збільшилася порівняно з нанесенням покриттів у середовищі повітря.

Ще однією перспективною обробкою, що дозволяє зміцнювати вироби у локальних місцях, без повного нагрівання деталі, є лазерна обробка (ЛО). ЛО може забезпечити зміцнення поверхневого шару виробу майже на 40 % [10]. Автори проводили лазерне азотування з використанням газової камери заповненої азотомісним середовищем. Обробка проводилася на сталі AISI P21. Забезпечення ефекту зміцнення пояснюється утворенням нітридів алюмінію на поверхні. Алюміній у даному випадку присутній у сталі.

Отже, комбіновані методи поверхневої обробки матеріалів є перспективними технологіями для подальшого вивчення. Вони можуть підвищити поверхневу міцність, зносостійкість, корозійну стійкість та ін. Покриття, які отримуються ЛО, або ЕІЛ можуть у подальшому замінити

стандартні технології ХТО та прискорити процеси нанесення покриття, а також нанести покриття лише у необхідній зоні, без нанесення захисту на поверхню виробу.

Метою роботи було вдосконалення технології підвищення якості поверхні виробів виготовлених із конструкційних сталей, шляхом розробки нового способу отримання азотних покриттів, нанесених методом електроіскрового легування, дослідження структури та фазового складу отриманих покриттів.

Покриття наносили у два етапи. Першим етапом було нанесення підшарку алюмінію на установці «Елітрон-52А». Для дослідження застосовували енергію розряду W_p = від 0,13 - 3,40 Дж. Алюміній наносили електродом, виготовленим із алюмінієвого дроту діаметром 3,0 мм, марки АТ. Далі на оброблену поверхню наносили пастоподібну суміш, що складалась з ~90 % сечовини та ~10 % вазеліну. Не чекаючи висихання суміші, проводили ЕІЛ електродом інструментом, ідентичним до марок сталей дослідного зразка (другий етап).

Визначення шорсткості поверхні після обробки проводили на приладі профілограф – профілометр 201, а результати виводилися у вигляді графіку на екран комп'ютера.

Металографічний та дюрOMETричний аналізи проводили за стандартними технологіями на оптичному мікроскопі «МІМ-7» та приладі ПМТ-3, відповідно.

Рентгеноструктурний аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3 у CoK_{α} -вимірюванні. Порядок та анодні струми були 30 кВ та 24 мА відповідно. Рентгенограми виконані по схемі із закінченням сканування, експонування 2 секунди у кожному місці. Результати виконані з допомогою програмного забезпечення software для Rietveld Refinement Analysis для полікристалічної фази.

На рис. 1 представлена мікроструктура зразка зі сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм при енергії розряду W_p = 3,4 Дж. З рисунку видно чіткі межі між основним металом та покриття з алюмінієм.

На рис. 2 зображена мікроструктура сталі 20 після азотування методом електроіскрового легування за пропонованою технологією: попереднє алітування, нанесення на оброблювану поверхню азотовмісної суміші, наступного легування електродом із сталі 20 з енергією розряду W_p = 0,13; 0,52 та 3,40 Дж.

Покриття складаються з ділянок: «білий шар», дифузійна зона та основний метал. Необхідно відмітити, що електроіскрові покриття мають характерну мікроструктуру.

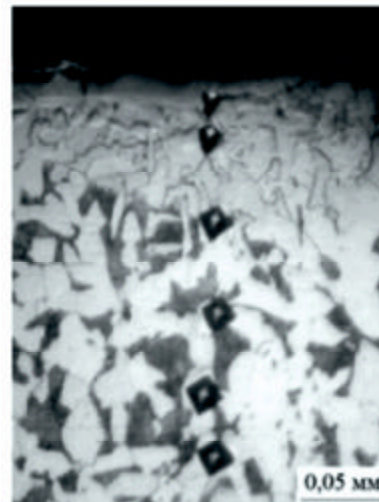


Рис. 1. Мікроструктура поверхні сталі після ЕІЛ алюмінієм.

Fig. 1. Microstructure of the steel surface after the ESA with aluminum.

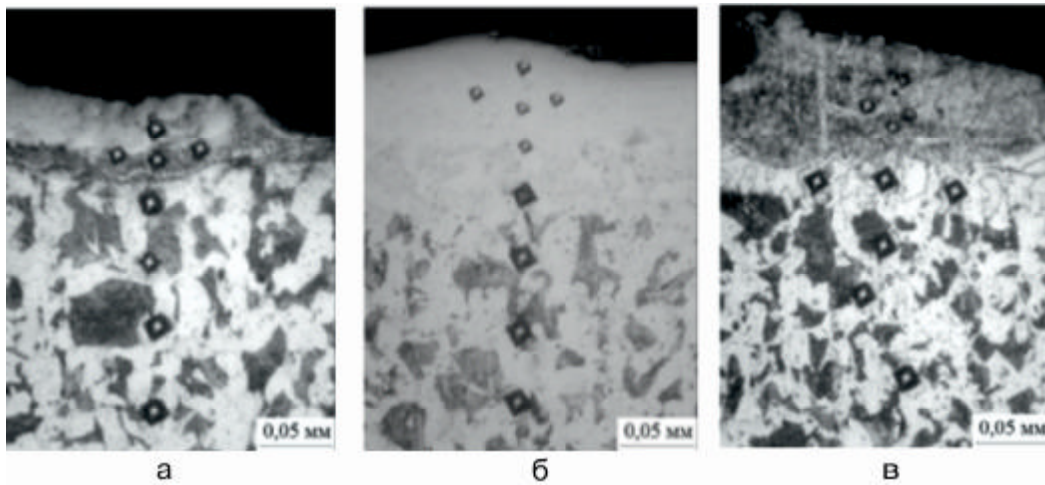


Рис. 2. Мікроструктура покриття зразків зі сталі 20 з підшаром алюмінію на сталі 20 при енергії розряду (W_p): а – 0,13; б – 0,52 і в – 3,40 Дж.

Fig. 2. The microstructure of the coating of steel 20 samples with a sublayer of aluminum on steel 20 at discharge energy (W_p): а – 0.13; б – 0.52 and в – 3.40 J.

На поверхні утворюється «білий» шар, який не піддається травленню звичайними реактивами. Як зазначають дослідники [3, 4], утворення «білих шарів» відбувається в умовах локальної дії високих температур і тисків. Висока швидкість тепловідведення призводить до того, що в межах товщини шару близько декількох мікрометрів температура швидко падає до температур плавлення і відповідних фазових перетворень. У зв'язку з цим, кристалізація, фазові перетворення, дифузія і хімічна взаємодія, що супроводжують процес ЕІЛ, призводять до утворення нерівноважних структур, високою гетерогенністю за складом, структурою та властивостями.

При енергії розряду $W_p = 0,13$ Дж (рис. 2 а) візуально покриття має різку зону переходу між дифузійним шаром та зоною основного металу, при $W_p = 0,52$ Дж (рис. 2 б) – покриття має суцільний шар від поверхні до зони основного металу з плавним переходом між шарами, при $W_p = 3,40$ Дж (рис. 2 в) – найбільш видиму зону переходу від покриття, підшарок, зона основного металу.

На рис. 3 представлений розподіл мікротвердості в отриманих покриттях. Як видно з графіку, алітування методом ЕІЛ сприяє підвищенню мікротвердості (рис. 3), причому мікротвердість поступово зменшується від покриття до основи.

Покриття, отримані за запропонованою технологією ЕІЛ, мають вищу мікротвердість, очевидно через вплив азоту та алюмінію на фазоутворення. Найвища твердість покриття, отримана при $W_p = 0,52$ Дж та $W_p = 3,40$ Дж становить ~ 9721 МПа (рис. 3). Як видно з графіку рис. 3 позиція 2, у покритті є зона з максимальною твердістю, що очевидно обумовлене легуванням алюмінієвого підшарку азотом та утворенням у цій зоні нітридних фаз.

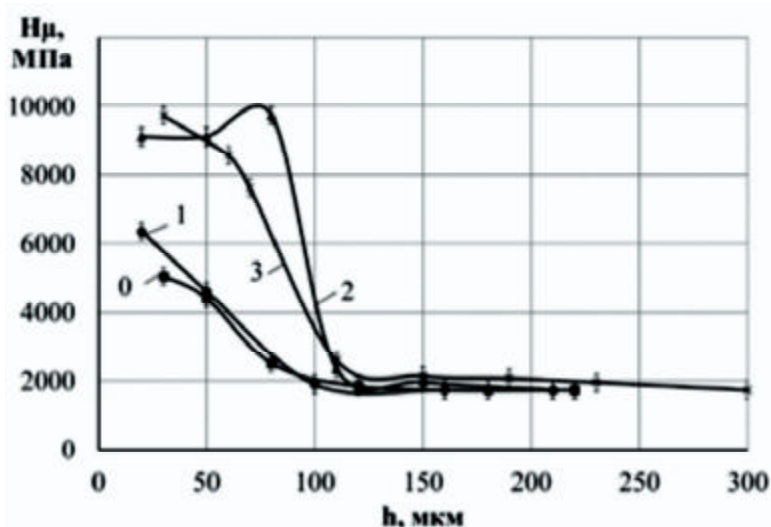


Рис. 3. Розподіл мікротвердості за глибиною від поверхні до основи на сталі 20: 0 – ЕІЛ алюмінієм; 1 – після азотування з енергією розряду $W_p = 0,13$ Дж; 2 – після азотування з енергією розряду $W_p = 0,52$ Дж; 3 – після азотування з енергією розряду $W_p = 3,40$ Дж.

Fig. 3. Distribution of microhardness by depth from the surface to the base on steel 20: 0 – ESA aluminum; 1 – after nitriding with discharge energy $W_p = 0.13$ J; 2 – after nitriding with discharge energy $W_p = 0.52$ J; 3 – after nitriding with discharge energy $W_p = 3.40$ J.

Результати досліджень мікротвердості, товщини і суцільності «білого шару» та визначення шорсткості зразків із сталі 20 та сталі 40 після азотування з та без підшарку алюмінію наведені у таблиці.

При збільшенні енергії розряду (W_p) зростає шорсткість поверхні. При нанесенні підшарку алюмінію на сталь 20 та 40 показники шорсткості покриття майже не змінюються, а суцільність «білого шару» покращується у середньому на 20 % (табл.), з чого можна зробити висновки, що підшарок алюмінію покращує суцільність покриття. Також зростає товщина покриття у середньому на 50-80 мкм.

Результати рентгеноструктурного аналізу покриттів на сталі 40 вказують на те, що фазовий склад представлений легованим ОЦК твердим розчином та кубічним нітридом заліза (рис. 4). Алюміній розчиняється у нітриді та фериті, також, існує ймовірність утворення підшарку з алюмінієвих фаз між сталлю та азотним покриттям. Після нанесення покриття мікротвердість за глибиною від поверхні (60-70 мкм) збільшується порівняно з поверхнею покриття (рис. 3 позиція 2).

Застосування комбінованої технології азотування з попереднім нанесенням на поверхню сталей підшарку алюмінію методом електроіскрової обробки забезпечує збільшення товщини дифузійного шару, підвищення його мікротвердості і якості робочої поверхні сталей. Це відкриває нові можливості поверхневого зміцнення відповідальних деталей та елементів насосного і компресорного обладнання.

Термічна і хіміко-термічна обробка

Параметри азотованих шарів на сталі 20 та сталі 40

Parameters of nitrided layers on steel 20 and steel 40

Енергія розряду, Дж	Товщина «білого шару», мкм	Мікротвердість «білого шару», МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність «білого шару», %
			R_a	R_z	R_{max}	
Без підшару алюмінію						
Сталь 20						
0,13	10-20	6228	0,9	2,1	7,5	50
0,52	10-20	7150	1,3	2,3	9,3	60
3,40	30-40	8969	6,2	16,3	40,6	70
Сталь 40						
0,13	10-25	6860	0,9	2	7,1	60
0,52	10-30	7450	1,4	2,2	8,3	70
3,40	30-50	9160	5,9	17,3	34,6	80
З підшаром алюмінію при $W_p = 3,4$ Дж						
Сталь 20						
0,13	60-70	6350	1,1	2,3	7,4	70
0,52	60-80	9721	1,5	2,2	9,4	80
3,40	90-110	9721	6,5	16,1	39,1	90
Сталь 40						
0,13	60-80	7050	0,9	2,1	7,3	80
0,52	60-90	9850	1,3	2,4	8,4	85
3,40	100-130	9910	5,9	17,3	35,7	90

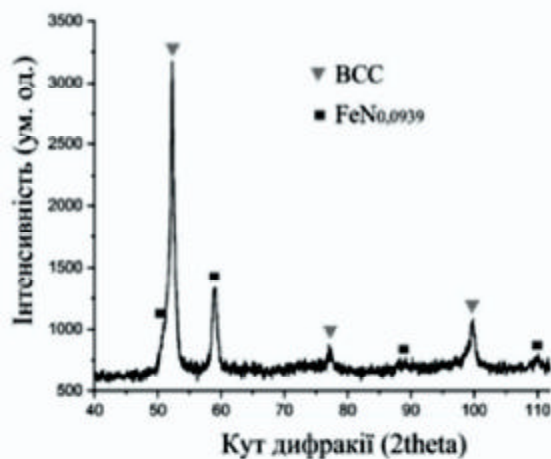


Рис. 4. Рентгенограми поверхні зразків із сталі 40 з підшарком алюмінію при $W_p = 0,52$ Дж.

Fig. 4. Radiographs of the surface of the samples of 40 steel with aluminum underlayer at $W_p = 0.52$ J.

Література

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г. Матеріалознавство. – К.: Вища освіта, 2012. – 548 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: В 3-х т. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1, 928с.; Т. 2, 559 с.; Т. 3, 557 с.
3. Tarel'nyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko Ye.V., Dovzhyk M.Ya. Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I. // *Metallophysics and advanced technologies*. – 2016. – Vol. 38. – № 12. – P. 1611-1633 <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1611>
4. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования. // *Перспективные материалы*. – 2011. – № 2. – С. 38-102.
5. Mosina T.V. Electric spark for the Composite Material of Both TiN– AlN and TiN – AlN – (Ni – Cr) Systems as the Method of Wear-Resistant Coating Application // *New Refractories*. – 2013. – № 9. – P. 61-64.
6. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam // *Physics Procedia*. – 2010. – Vol. 5, Part A. – P. 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>
7. Іващенко Є.В., Лобачова Г.Г., Мазанко В.Ф. Формування поверхневого зміцненого шару при хіміко- термічній обробці заліза, поєднаній з електроискровим легуванням // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 3. – С. 39-42.
8. Храмовська К.М., Мазанко В.Ф., Іващенко Є.В., Лобачова Г.Г. Вплив середовища легування та додаткового азотування на мікротвердість, структуру та фазовий склад залізної підкладки // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2010. – Т. 8, № 4. – С. 371-375.
9. Завойко О.С., Новіков С.М. Механізм процесу електроискрового легування із газовим осадженням // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2013. – № 3(48). – С. 119-126.
10. Sim, Park C., Kang N., Kim Y., Chun E-J. Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel // *Optics and Laser Technology*. – 2019. – № 116. – P. 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.040>

References

1. Aftandilyants E.G., Zazymko O.V., Lopatko K.G. *Materialoznavstvo* (Materialsscience), Kyiv: Vyshcha osvita, 2012, 548 p. [in Ukrainian].
2. Anuryev V.I. *Spravochnik konstruktora mashinostroitelya* (Handbook of the designer of the machinebuilder): in 3 Vol., M.: mechanical engineering, 2006, Vol. 1, 928 p.; Vol. 2, 559 p.; Vol. 3, 557 p. [in Russian].
3. Tarel'nyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko Ye.V., Dovzhyk M.Ya. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2016, Vol. 38, No.12, pp. 1611–1633 [in English]. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1611>
4. Korotaev D.N., Ivanova E.V. *Perspektivnyye materialy*, 2011, No. 2, pp. 38-102 [in Russian].
5. Mosina T.V., *New Refractories*, 2013, No.9, pp. 61-64. [in English].

6. Radek N., Bartkowiak K., Physics Procedia, 2010, Vol. 5, Part A, pp. 417-423 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>
7. Ivashchenko E.V., Lobachova H.G., Mazanko V.F. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2010, No.3, pp. 39-42 [in Ukrainian].
8. Khranovska K.M., Mazanko V.F., Ivashchenko E.V., Lobachova H.G. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 2010, Vol. 8, No. 4, pp. 371-375 [in Ukrainian].
9. Zavoyko O.S., Novikov S.M. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2013, No. 3 (48), pp. 119-126. [in Ukrainian].
10. Sim, Park C., Kang N., Kim Y., Chun E-J. *Optics and Laser Technology*, 2019, No. 116, pp. 305-314 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.040>

Одержано 16.02.23

O. P. Gaponova, V. O. Okhrimenko, N. V. Tarelnik, O. M. Myslyvchenko

Improving the technology of nitridation by the electro-spark alloying method

Summary

The work shows studies aimed at developing methods for protection of structural steels on the example of steels 20 and 40, from wear, using the electricity spark alloying (ESA), by applying the nitrogen-like mixture on the treated surface with subsequent vanity of steel electrode appropriate to the material of the workpiece. To increase the thickness of the surface layer and the best adhesion of the coating is offered in front of the ESA electrode-tools made of steel of the corresponding brand, to form a mold of aluminum, using an electrode from the aluminum bar of the brand of blood pressure. Metrolographic studies were performed and the distribution of micro randomness in the coating. Studies have shown that nitrogen-containing coatings consist of a "white layer", which smoothly goes into the diffusion zone and base metal. The obtained coatings have the highest thickness of "white layer" 110-130 microns. The results of the study of the micro-hardness of the obtained nitrogen-containing coatings indicate an increase in hardness to 9700-9910 MPa. The phase composition of nitrogen coatings is represented by a alloy solid and cubic iron nitride, aluminum dissolves in nitride and ferrite. The considered methods of application of nitrogen-containing coatings can be used to strengthen the surface of responsible parts and elements of pumping and compressor equipment: end surfaces of rings, for protective bushings; piston machines, mechanisms that have increased wear of the product, etc.

Keywords: electro-spark alloying, microstructure, nitriding, steel, phase analysis