

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ЗМІЦНЕННІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ “ВАЛ”

Ф. В. Козак, І. Б. Прунько*, В. Я. Феденько, М. Р. Гладун

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: igorprynko@gmail.com

Необхідність застосування деталей вузлів та механізмів з стійкими параметрами щодо впливу зовнішніх факторів призводить до пошуку рішень з забезпечення ефективної поверхневої обробки. Завдяки своїй ефективності, низькій собівартості та відносній простоті проведення виділяється технологія нанесення електроіскрового покриття. Застосування процесу електроіскрового легування дозволяє покращити мікрорельєф поверхні та підвищити її міцність, водночас сприяє відновленню поверхні деталі після її зношування. Отриманий ефект знаходить застосування при зміцненні деталей автомобільної галузі, нанесення покриття на деталі типу “вал” підвищують характеристики тертя та зносостійкості. Процес електроіскрового легування базується на використанні енергії утвореної під час електричного розряду між двома електродами, отриманий імпульс сприяє виникненню електричної ерозії. Локальний розігрів поверхні анода(електроду) призводить до руйнування та закріплення частинок матеріалу на поверхні катода(деталі). Особливо актуальним даний метод нанесення покриття є при мінімальних зношеннях поверхонь (посадочні місця під підшипники на валах і в корпусах автомобільних вузлів, шипи хрестовин карданних валів та ін.) через мінімальний температурний вплив на оброблювану деталь. Важливим фактором який має суттєвий вплив на кількісні та якісні показники поверхневого шару є вибір електроду для нанесення покриття. В роботі досліджується процес використання твердосплавних матеріалів типу VK8 (WC – 92%, Co – 8%) та T15K6 (WC – 79%, TiC – 15%, Co – 6%) при отриманні зміцненого шару. Актуальною проблемою є вибір режиму в якому проводиться легування поверхні, оскільки від цього залежить структура та склад отриманого шару. Тому в статті проаналізовано результати експериментальних досліджень щодо впливу режиму роботи установки на величину мікротвердості для кожного з електродів. До основних параметрів що характеризують ефективність процесу є величина зчеплення покриття з основою; відповідно до отриманих результатів максимальне значення для електроду T15K6 становить 54,2 МПа, для VK8 53,6 МПа. Залишкові напруження стиску фіксувались тільки при використанні електроду VK8 у режимі 3 -90 МПа, для T15K6 максимальні залишкові напруження розтягу спостерігались в режимі 1 1340 МПа.

Ключові слова: нанесення електроіскрових покриттів; підвищення зносостійкості деталей; зміцнення деталей типу “вал”.

The need to use parts of components and mechanisms with stable parameters with respect to the impact of external factors leads to the search for solutions to ensure effective surface treatment. Due to its efficiency, low cost and relative simplicity, the technology of applying electric spark coating stands out. The use of the electric spark alloying process improves the surface microrelief and increases its strength, while also helping to restore the surface of the part after wear. This effect is used to strengthen parts for the automotive industry, and the coating of shaft-type parts improves friction and wear resistance characteristics. The process of electrospark alloying is based on the use of energy generated during an electric discharge between two electrodes, the resulting impulse contributes to the occurrence of electrical erosion. Localized heating of the anode (electrode) surface leads to the destruction and fixation of material particles on the cathode (part) surface. This method of coating is especially relevant for minimal surface wear (bearing seats on shafts and in automotive housings, spikes of cardan shaft crosses, etc.) due to the minimal temperature effect on the workpiece. An important factor that has a significant impact on the quantitative and qualitative characteristics of the surface layer is the choice of the electrode for coating. This paper investigates the process of using carbide materials such as VK8 (WC – 92%, Co – 8%) and T15K6 (WC – 79%, TiC – 15%, Co – 6%) to obtain a hardened layer. An urgent problem is the choice of the mode in which the surface is alloyed, since the structure and composition of the resulting layer depends on it. Therefore, the paper analyzes the results of experimental studies on the effect of the installation operating mode on the microhardness value for each of the electrodes. The main parameters characterizing the efficiency of the process include the value of adhesion of the coating to the substrate; according to the results obtained, the maximum value for the T15K6 electrode is 54.2 MPa, for the VK8 53.6 MPa. The residual compressive stresses were recorded only when using the VK8 electrode in the range of 3-90 MPa, for T15K6 the maximum residual tensile stresses were observed in the range of 1 1340 MPa.

Key words: electrospark coating, increasing the wear resistance of parts, strengthening of shaft-type parts.

Вступ

Автомобільний транспорт є ключовою складовою у сучасному світі та відіграє важливу роль у розвитку суспільства та економіки. Важливим аспектом є те, що стрімкий розвиток автомобільної галузі вимагає пошуку методів, що сприятимуть підвищенню надійності та довговічності вузлів і деталей, які піддаються впливу негативних факторів. Серед числа способів покращення властивостей матеріалів деталей автомобільного транспорту, ефективними є нанесення на робочу поверхню зносостійких покриттів. Одним із доступних та ефективних методів, що забезпечує хороші трибологічні і корозійностійкі покриття, є метод електроіскрового легування [1, 2]. Процес базується на використанні енергії, утвореної під час електричного розряду між двома електродами. Отриманий імпульс сприяє виникненню електричної ерозії. Локальний розігрів поверхні анода (електрода) призводить до руйнування та закріпленні частинок матеріалу на поверхні катода(деталі). Ефективність процесу залежить від кількості матеріалу, що закріплюється на поверхні за одиницю часу. Метод нанесення електроіскрового покриття характеризується відносною простотою виконання, низькою вартістю й ефективністю процесу і добре підходить для оброблення поверхні деталей, які піддаються посиленому зносу, зокрема обертових частин автотранспорту [3]. Особливо актуальним даний метод нанесення покриття є при мінімальних зношеннях поверхонь (посадочні місця під підшипники на валах і в корпусах автомобільних вузлів, шипи хрестовин карданних валів та ін.) через мінімальний температурний вплив на оброблювану деталь. З метою уникнення посиленого зносу контртіла рекомендується одночасне нанесення зміцнюючого покриття на обидві контактуючі поверхні. Актуальним завданням є дослідження властивостей поверхні нанесеного покриття на вал автомобіля і дослідження впливу зовнішніх факторів на характеристики поверхні.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

На практиці використання процесу електроіскрового легування дозволяє значно підвищити довговічність деталей машин і механізмів, покращуючи їх мікротвердість та резистивність до впливу негативних зовнішніх факторів [4]. Зокрема, виділяють два типи застосування: реставрація пошкоджених ділянок деталі та нанесення додаткового захисного покриття на основу деталі. Ефективним є також зміц-

нення деталей та вузлів, що піддаються тертю, втомному зношуванню і впливу корозії [5, 6]. Деталі типу “Вал” автотранспорту виготовляють з конструкційних і легованих сталей. Зазвичай використовуються сталі марки: 40, 45, 35X, 40X, 25XГМ, 20XГМ, 19XГН, 15XГНТ2 [7]. Важливим фактором, який має суттєвий вплив на кількісні та якісні показники поверхневого шару, є вибір електроду для нанесення покриття [8]. Залежно від конкретних умов використання можна виділити наступні категорії електродних матеріалів: зносостійкі, які містять карбідів W, Mo, Ti, V, Cr та інші; корозійностійкі матеріали Al, Fe, Ni; тугоплавкі і дорогі метали Re, Nb, Ir, Ag тощо. Процес отримання зміцненого шару протікає в режимі короткого замикання між анодом і катодом у газовому міжелектродному проміжку, що зумовлює зустрічний рух електронів і позитивних іонів [9,10].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз наявних літературних досліджень свідчить про недостатню кількість інформації щодо застосування методу електроіскрового легування для зміцнення деталей, виготовлених зі сталі марки 40X та складових автомобільної промисловості. Серед електродів для обробки у роботі пропонується використати тврдосплавні матеріали типу BK8(WC – 92%, Co – 8%) та T15K6(WC – 79%, TiC – 15%, Co – 6%).

Мета та завдання досліджень

Ремонтні майстерні нафтогазового технологічного транспорту не завжди оснащені сучасним технологічним обладнанням та забезпечені кадрами відповідної кваліфікації. Актуальним є підбір технологічних процесів реставрації деталей в умовах цих майстерень з точки зору їх простоти, дешевизни та продуктивності.

Необхідно використовувати такі процеси реставрації автомобільних деталей, які б не вимагали високої кваліфікації ремонтних робітників, одночасно забезпечуючи високу якість виконаної роботи.

Метою даної роботи є запропонувати спосіб відновлення і зміцнення зношених робочих поверхонь деталей, придатний для застосування в умовах авторемонтних майстерень підприємств нафтогазового технологічного транспорту.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для нанесення шару захисного покриття важливим є вибір електроду, оскільки від його

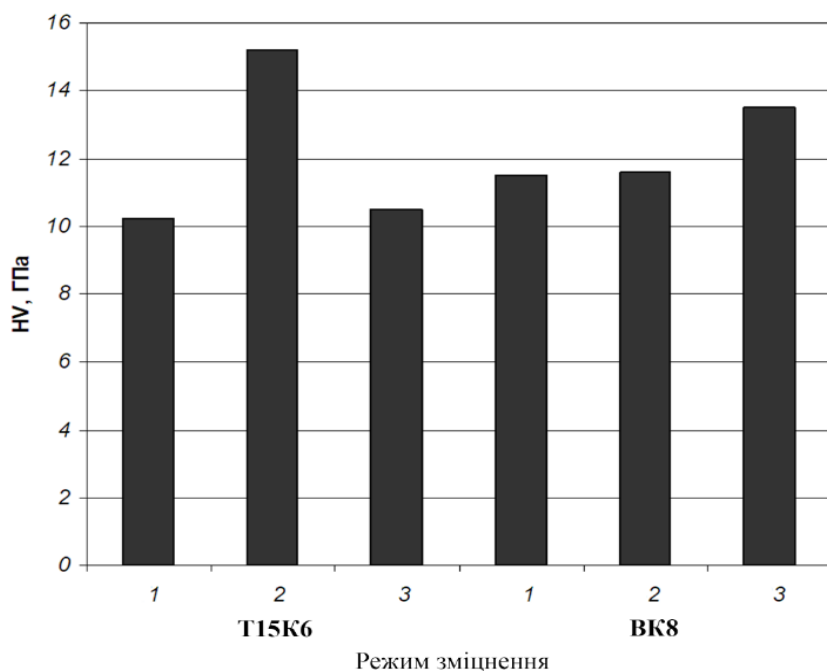


Рисунок 1 – Значення мікротвердості HV для різних режимів зміцнення

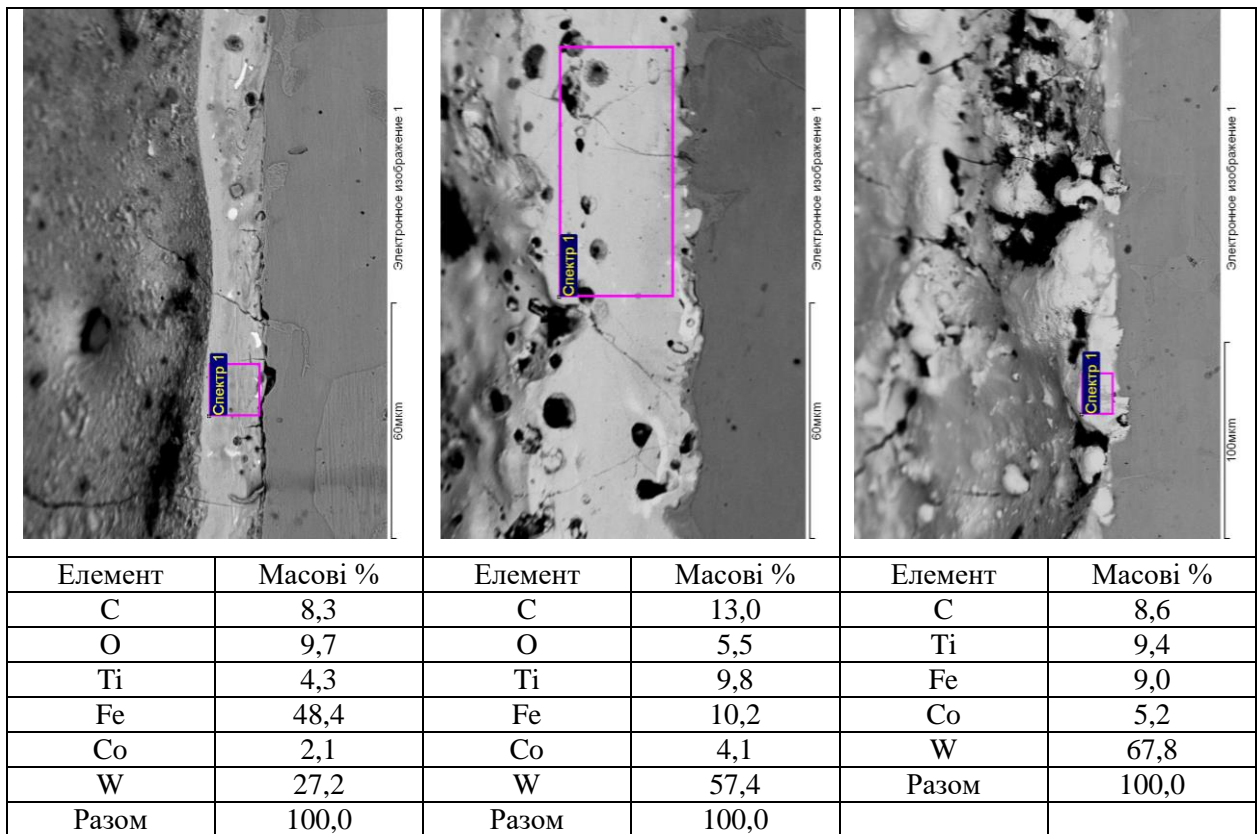
характеристик залежатиме склад отриманого покриття оброблюваної поверхні. Якість обробки характеризується внутрішніми напруженнями, мікроструктурою поверхневого шару та її фізико-механічними властивостями. У ході проведення досліджень було обрано сплави BK8 та T15K6, перевагою яких є доступність (як електрод використовуються твёрдосплавні пластинки, зняті з металорізального інструменту, який вийшов з ладу і підлягає списанню), і можливість отримати бажані характеристики поверхонь.

Проведений металографічний аналіз отриманого покриття свідчить про те, що товщина нарощеного шару коливалася у проміжку від 8 до 20 мкм. Величина мікротвердості отриманого шару знаходиться в діапазоні від ~10,2 до ~15,2 ГПа, в залежності від вибраного режиму роботи установки при нарощуванні. Найвищого значення мікротвердості вдалось досягти при використанні електроду T15K6 у режимі 2. Для електродів BK8 найбільше значення мікротвердості фіксувалося у режимі 3. При цьому різниці між режимами 1 та 2 практично немає. Значення режиму роботи установки характеризується ємністю конденсаторів для накопичення енергії, відповідно вища ємність конденсаторів призводить до більшого значення енергії одного імпульсу, яка становить: 0,22 Дж для режиму 1; 0,42 Дж для режиму 2 та 0,75 Дж для режиму 3. Випробування отриманого покриття на твердість проводили методом Віккерса. Гістограма розподілу значень наведена на рисунку 1. Вищий рівень мікротвердості обумовлений ви-

сокою концентрацією елементів легування у отриманому шарі. Проведений аналіз елементного складу дає підстави зробити висновки про утворення карбідів, що переносяться у поверхневий шар в процесі легування. В отриманих зміцнених шарах при використанні сплавів T15K6 переважають, в основному, частинки вольфраму і титану (рис. 2). Структури з найменшими перепадами глибини досягались у режимі нанесення 1, а з найбільшими – у режимі 3. Максимальна мікротвердість для електроду з сплаву BK8 отримана для режиму 3 (рис. 3). В даному випадку у площинах поверхні виявлено високу кількість різних за величиною округлих ямок. Кількість цих ямок залежить від режиму нанесення, найменшою величиною характеризувався режим 1, а у режимі 2 спостерігались ямки, найбільші за розмірами.

У процесі електроіскрової обробки важливо враховувати фактор виникнення внутрішніх напружень, що виникають через нагрівання і охолодження поверхні, збільшення градієнту температури призводить до збільшення кількості внутрішніх напружень. Для електроду BK8 напруження розтягу фіксувались у режимах обробки 1 і 2, а у режимі 3 виникали напруження стиску. У випадку використання T15K6 залишкові напруження розтягу фіксувались незалежно від вибраного режиму обробки (табл. 1).

Покриття, отримані в процесі електроіскрового легування, характеризуються високою міцністю зчеплення. Сутність методу оцінки міцності при зсуві полягає в тому, що циліндричний зразок з досліджуваним матеріалом,

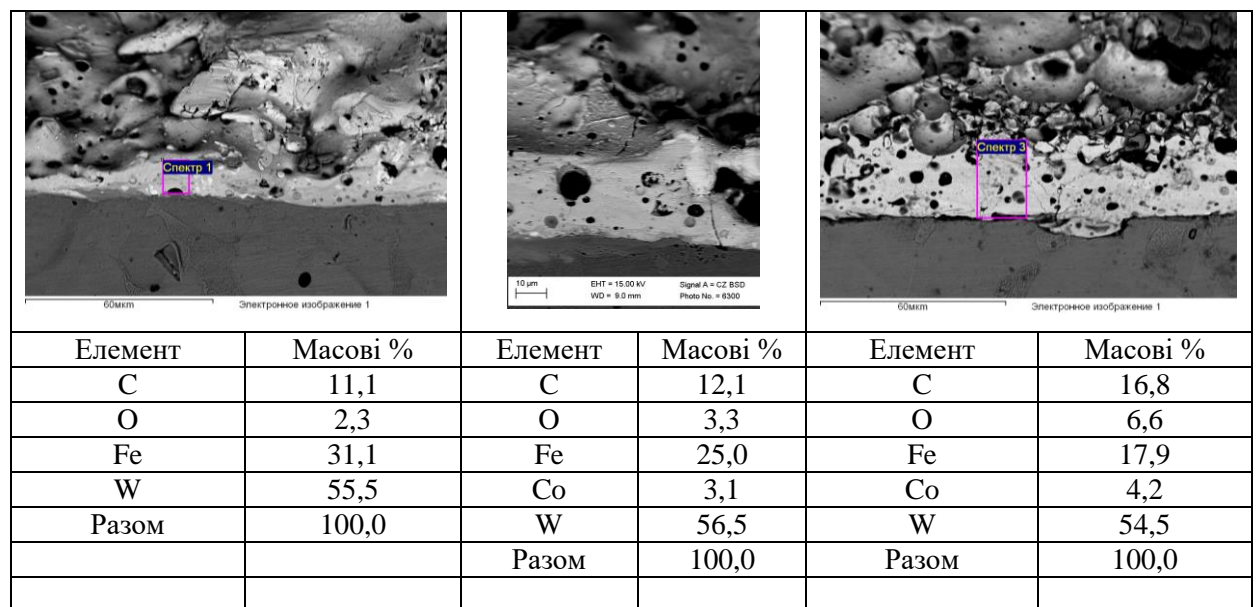


а (x350)

б (x350)

в (x200)

Рисунок 2 – Характерна структура та склад (за результатами мікроаналізу) поверхнього шару сталі 40Х після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твёрдосплавних пластинок Т15К6 у режимі Т1 (а), Т2 (б) та Т3 (в)



а (x400)

б (400)

в (x400)

Рисунок 3 – Характерна структура та склад (за результатами мікроаналізу) поверхнього шару сталі 40Х після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твёрдосплавних пластинок ВК8 у режимі В1 (а), В2 (б) та В3 (в)

Таблиця 1 – Максимальні залишкові напруження у нарощених шарах

Режим	Матеріал електроду	Середня товщина нарощеного шару, мкм	Прогин балки, мкм	Залишкові напруження, МПа
1	T15K6	10	150	1340
2		15	120	710
3		15	150	900
1	VK8	10	105	900
2		20	195	900
3		20	-20	-90

Таблиця 2 – Міцність зчеплення нанесеного покриття з основою

Режим	Матеріал електроду	Зусилля, що передусе руйнуванню Р, Н	Границя міцності зчеплення нанесеного матеріалу з основою, МПа
1	T15K6	11800	50,1
2		12600	53,4
3		12750	54,2
1	VK8	11700	49,7
2		12300	52,3
3		12650	53,6

Таблиця 3 – Значення залишкових напружень для отриманого шару

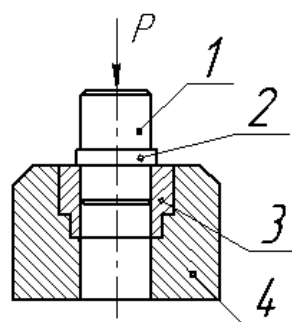
Режим	Матеріал електроду	Середня товщина нарощеного шару, мкм	Залишкові напруження, МПа
1	T15K6	10	1340
2		15	710
3		15	900
1	VK8	10	900
2		20	900
3		20	-90

нанесеним на нього у вигляді кільцевого пояса, продавлюється через матрицю (рис. 4). Для визначення кількісних характеристик величини зчеплення покриття з основою доцільно проводити додаткові випробування на міцність. Виділяють випробування на міцність при згині та зсуві. Границя міцності зчеплення покриття з основою деталі визначається за формулою:

$$\tau_{зр} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot h_n} \quad (1)$$

Елементний склад отриманого покриття електродами T15K6 свідчить про найвищий інтегральний вміст таких частинок, як вольфрам та кобальт після застосування режиму 3, найнижчий – у режимі 1. Вміст титану практично однаковий 2 і 3 режимів, але практично вдвічі нижчий у 1. Використовуючи можливості електронної мікроскопії у режимі 2, спостерігалась евтектика TiC-WC₃ карбідами величиною 0,05...0,1 мкм. Це пояснюється отриманням найвищої мікротвердості HV_у режимі 2.

Візуально мікроструктура отриманого шару для сплавів T15K6 та VK8 практично не відрізняється, проте мікротвердість відрізняється до-



1 – зразок; 2 – шар металопокриття;
3 – матриця; 4 – корпус

Рисунок 4 – Схема випробування зразків на міцність зчеплення при зсуві

сяється, проте мікротвердість відрізняється досить суттєво. Аналіз складу шару, отриманого з використанням VK8 свідчить про найвищий вміст заліза у режимі 1, що і пояснюється найнижчим значенням мікротвердості. Вміст вольфраму практично не змінювався при вибраному режимі оброблення, вуглець у поверхневому шарі 3 вищий, ніж у режимі 3.

Висновки

В результаті дослідження структури зміцнених шарів, отриманих методом електроіскрового легування, вдалось отримати максимальне значення мікротвердості HV для електроду T15K6, що становило 15,2 ГПа, границя міцності зчеплення покриття з основою досягала найбільшого значення у режимі нанесення 3, а максимальні залишкові напруження 1340 МПа у режимі 1. Максимальне значення мікротвердості при використанні твёрдосплавного матеріалу ВК8 досягалося у режимі нанесення 3. Важливим є факт наявності в цьому ж режимі залишкових напружень стиску, які становили 90 МПа. Границя міцності зчеплення досягала значення 53,6 МПа. Отримані шари покриття складаються, в основному, з карбідів титану і вольфраму, завдяки чому поверхневий шар володіє достатньою величиною мікротвердості і може забезпечувати довговічність та стійкість до впливу негативних факторів обертових деталей, які піддаються посиленню механічним навантаженням.

Опираючись на результати металографічних досліджень, прогнозуємо, що найбільшою опірністю до зношування будуть володіти деталі, оброблені методом електроіскрового легування із застосуванням електроду T15K6 у режимі T2 (ємність конденсаторної батареї 150 ± 15 мкФ, частота вібрації електроду 250 ± 50 Гц), як такі, що мають найвищу мікротвердість поверхні (15,2 ГПа) та деталі, оброблені з застосуванням електроду ВК8 у режимі В3 (ємність конденсаторної батареї 330 ± 30 мкФ, частота вібрації електроду 125 ± 25 Гц), як такі, що поєднують високу поверхневу мікротвердість (13,5 МПа) та залишкові напруження стиску в нанесеному шарі (-90 МПа).

Література

1. Johnson Roger N., Sheldon G. L. Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 4.6. 1986. P. 2740-2746.
2. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*. 2023. No 13(8). P. 1473.
3. Marchenko D. D., Matvyeyeva K. S. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology* 28.1/107. 2023. P. 65-72.
4. Завойко О. С., Новіков С. М. Механізм процесу електроіскрового легування із газовим

осадженням. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3 (48). С. 119-126.

5. Zhengchuan Zhang, et al. Промислове нанесення покриттів на втулку підшипника за технологією електроіскрового легування. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. № 1 (52). С. 15-23.

6. Щепетов В. В., Довгаль А. Г., Бурдюженко Л. В. Електроіскрове легування для підвищення триботехнічних характеристик деталей авіаційної техніки. *Advances in aerospace technology*. 2004. No 19.1. P. 83-87.

7. Руденко Л. Ф., Говорун Т. П. Леговані сталі та сплави. Суми: СумДО, 2012. 171 с. ISBN 978-966-657-431-5.

8. Дем'янчук Я. М., Войцехівська Т. Й., Сумер А. Р. Вплив хімічного складу електродів для електроіскрового легування на трибологічну поведінку штоків нафтових насосів. *Наукові нотатки*. 2015. № 49. С. 47-50.

9. Radek Norbert, Konrad Bartkowiak. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010. No 5. P. 417.

10. Barile C., Casavola C., Pappalè G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022. No 12(10). P. 1536.

References

1. Johnson Roger N., Sheldon G. L. Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 4.6. 1986. P. 2740-2746.
2. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*. 2023. No 13(8). P. 1473.
3. Marchenko D. D., Matvyeyeva K. S. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology* 28.1/107. 2023. P. 65-72.
4. Zavoiko O. S., Novikov S. M. Механізм процесу електроіскрового легування із газовим осадженням. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2013. No 3 (48). P. 119-126. [in Ukrainian]
5. Zhengchuan Zhang, et al. Промислове нанесення покриттів на втулку підшипника за технологією електроіскрового легування. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. 2022. No 1 (52). P. 15-23.

6. Shchetov V. V., Dovhal A. H., Burdizhenko L. V. Elektroiskrove lehuвання dlia pidvyshchennia trybotekhnichnykh kharakterystyk detalei aviatsiinoi tekhniki. *Advances in aerospace technology*. 2004. No 19.1. P. 83-87. [in Ukrainian]

7. Rudenko L. F., Hovorun T. P. Lehovanistali ta splavy. Sumy: SumDO, 2012. 171 p. ISBN 978-966-657-431-5. [in Ukrainian]

8. Demianchuk Ya. M., Voitsekhivska T. Y., Sumer A. R. Vplyv khimichnoho skladu elektrodiv dlia elektroiskrovoho lehuвання na trybolohichnu povedinku shtokiv naftovykh nasosiv. *Naukovi notatky*. 2015. No 49. P. 47-50. [in Ukrainian]

9. Radek Norbert, Konrad Bartkowiak. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010. No 5. P. 417

10. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022. No 12(10). P. 1536.