

**Оксана Петрівна Гапонова¹, В'ячеслав Борисович Тарельник²,
Наталія В'ячеславівна Тарельник³, Геннадій Павлович Лапоног⁴,
Дмитро Володимирович Торгачов⁵**

¹доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. **ResearcherID:** 56938828500

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: tarellyk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2005-5861>. **ResearcherID:** 56436591000

³кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: natasha-tarellyk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. **ResearcherID:** 57195836961

⁴аспірант кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: glaponog@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

⁵студент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: torgachovdmitriy@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ І ЛАЗЕРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Проведені дослідження з визначення абразивної зносостійкості покриттів, отриманих на сталі 12X18H10T, методами електроіскрового легування (ЕІЛ) і комбінованою технологією – ЕІЛ, нанесення армованого металополімерного матеріалу з наступним лазерним обробленням (ЛО). Зразки після поверхневого оброблення підлягали металографічним дослідженням, визначенню розподілу мікротвердості, а також випробуванням на абразивну зносостійкість. Застосування комбінованої технології дозволило збільшити товщину покриття до 600 мкм з мікротвердістю 7,3...10,0 ГПа. При цьому абразивна зносостійкість зросла у 7,5 раза, порівняно зі зразками без покриття.

Ключові слова: електроіскрове легування; лазерне оброблення; мікроструктура; абразивна зносостійкість; покриття.

Рис.: 5. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. За оцінками вчених, близько 50 % поломок, які виникають під час експлуатації машин і механізмів, можуть бути пов'язані з абразивним зношуванням [1; 2]. Крім того, такий вид зношування також може вплинути на надійність та довговічність деталей. І сільське господарство, і гірничодобувна промисловість (видобуток і переробка корисних копалин) вимагають використання обладнання, що безпосередньо контактує з гострими твердими породами під час земляних робіт. Такі контакти призводять до пошкоджень, руйнування та втрати матеріалу, і цей процес називається абразивним зношуванням. До того ж значна кількість деталей машин, наприклад, центрифуг (машин для розділення неоднорідних систем у відцентровому полі), що знайшли широке застосування в хімічній, нафтопереробній, харчовій галузях промисловості, а також на очисних спорудах для очищення стічних вод великих міст і підприємств (м'ясокомбінатів, риболовецьких суден та ін.), зазнають гідроабразивного зношування.

Як відомо, абразивне зношування виникає, коли поверхні виробів піддаються високому механічному навантаженню через наявність більш твердих частинок, які можуть діяти як абразив [3]. Під час роботи відбувається зношування шляхом мікрорізання, мікроруйнування та прискореної втоми внаслідок періодичних деформацій, таких як мікротиснення або виривання окремих зерен.

Щоб вирішити проблеми абразивного зношування, застосовують різні інженерні рішення, наприклад, використання високолегованих сталей, застосування спеціальних видів термічного оброблення, поверхневої модифікації тощо [4]. Таким чином, розроблені високолеговані сталі, які володіють доброю зносостійкістю, що передусім пояснюється наявністю твердих фаз, таких як мартенсит, карбіди або борида [5]. Незважаючи на те, що ці сталі

відомі своєю високою зносостійкістю, вони також забезпечують достатню міцність. Досягнення відповідного співвідношення твердості та в'язкості має вирішальне значення для зносостійких матеріалів, оскільки це забезпечує здатність матеріалу протистояти динамічним навантаженням та запобігати передчасному руйнуванню. Однак використання дорогих і рідкісних елементів для легування з метою формування твердих зміцнювальних фаз сприяє підвищенню ціни матеріалу. Крім того, для досягнення бажаних властивостей зазвичай потрібна трудомістка та дорога термічна або термомеханічне оброблення. Тому ефективним рішенням забезпечення абразивної зносостійкості є формування покриттів на робочих поверхнях з високою адгезійною міцністю.

Постановка проблеми. Властивості поверхні значною мірою контролюють інженерні характеристики матеріалу і, по суті, визначають його функціональні властивості. У зв'язку з цим покриття, призначені для посилення однієї або декількох властивостей поверхні матеріалу, залежать від вимог до деталі.

На сьогодні є значна кількість методів модифікації поверхні. Найбільш затребуваними є методи, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ). Серед них заслуговує уваги електроіскрове легування (ЕІЛ) завдяки своїм перевагам, таким як просте обладнання та легкість експлуатації, міцне металургійне з'єднання покриття з основою, екологічність та економічність [6]. ЕІЛ використовується для відновлення деталей і нанесення покриття на металеві матеріали [7]. Процес ЕІЛ заснований на явищі електроерозії та полярному перенесенні матеріалу анода (електрода) на катод (деталь) під час імпульсного електричного розряду між анодом і катодом, який відбувається в газовому середовищі. Розряд призводить до викиду дуже гарячих мікрочастинок електродного матеріалу в мікровакуум розплаву на катоді, перемішування матеріалу і швидкого затвердіння після його завершення. Унаслідок багаторазової дії розрядів на поверхні з'являються утворюється покриття, що забезпечує економію енергії, оскільки відсутній об'ємний нагрів підкладки. Основні переваги ЕІЛ-покриттів пов'язані зі слабкою термічною дією на матеріал основи та міцним металургійним зв'язком перенесеного матеріалу з підкладкою, що забезпечує високу адгезію покриття. Крім того, процес ЕІЛ є екологічним та енергоефективним. Багато досліджень показали, що до недоліків електроіскрових покриттів можна віднести як високу концентрацію дефектів, таких як пористість і мікротріщини, так і високу шорсткість поверхні [8].

З метою усунення дефектів, що виникли під час ЕІЛ, підвищення ефективності процесу, застосовують комбіновані технології на основі ЕІЛ, такі як послідовне ЕІЛ і поверхневе пластичне деформування (ППД), ЕІЛ і лазерне оброблення (ЛО), ЕІЛ і магнетронне напилення тощо [9; 10]. Подальше оброблення забезпечує підвищення якості ЕІЛ покриттів, знижує шорсткість, сприяє забезпеченню міцнішого адгезійного зв'язку з підкладкою, позитивно впливає на властивості тощо. Тому розроблення інтегрованих методів синтезу покриттів на основі КПЕ є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для захисту поверхонь деталей, що працюють в умовах абразивного зносу, дедалі більшого застосування знаходить метод електроіскрового легування (ЕІЛ) [11-13]. Використання інтегрованих технологій може сприяти збільшенню товщини шару, відновленого методом ЕІЛ, дозволяючи створювати поверхневі шари із заданими фізико-хімічними та механічними властивостями [14].

Дослідники [15; 16] вважають дуже ефективними процеси комбінованого оброблення, які поєднують вплив іскрового розряду та подальше ЛО на зміцнювану поверхню. ЛО дозволяє зменшити пористість ЕІЛ-покриттів, усунути подряпини, тріщини та неоднорідності, а також підвищити щільність покриття [17]. Під впливом лазерного імпульсу відбувається локальне плавлення ЕІЛ покриття і сталевий підкладки під ним. У результаті

термокапілярної конвекції, спричиненої нерівномірним розподілом температури на поверхні розплаву і віддачею потоку плазми, легувальна речовина дифундує в підкладку, що дозволяє значно збільшити глибину легованого шару [18]. Проте ЛО може призвести до вигорання (випаровування) легкоплавких компонентів, тому комбіновані технології отримання покриттів, що включають ЛО, потребують додаткових досліджень.

Актуальним напрямком є поєднання електричного впливу на поверхню з подальшим нанесенням полімерних [19] і металополімерних матеріалів (МПМ) [20]. Технологія ЕІЛ + МПМ дає змогу отримати необхідну висоту мікронерівностей (шорсткість), а подальше лезове оброблення – забезпечити різне співвідношення площ із нанесеного металу та МПМ. Як армувальний матеріал МПМ можна використовувати волокна, дроти, порошки мікро- та нанорозмірів тощо. У роботі [21] досліджено композиційний матеріал, армований дротами, але досягти рівномірного розподілу армуючих елементів не вдалося. Отже, дослідження структури та властивостей композиційних матеріалів, призначених для нанесення покриттів КПЕ, потребує подальшого розвитку та вдосконалення технології.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Нині актуальними є комбіновані технології модифікації поверхні й формування функціональних покриттів. Не досліджено впливу режимів ЛО під час комбінованого оброблення на структуру та властивості покриттів.

Метою статті є дослідження структури та властивостей комбінованих покриттів на сталі, отриманих послідовним ЕІЛ, нанесенням МПМ, армованим порошком ВК6, з наступним лазерним обробленням.

Методика досліджень. У ролі підкладки використовували зразки зі сталі 12Х18Н10Т розміром 15×15×8 мм. ЕІЛ здійснювали на установці «Елітрон 52-А». Як електрод інструмент (ЕІ) використовували твердий сплав марки Т15К6, яким відповідно до [22] здійснювали процес легування, що забезпечувало 100 % суцільність, товщину прирощеного шару 0,12 мм і шорсткість поверхні $R_z = 37$ мкм. Далі на оброблену поверхню наносили МПМ, який виготовляли шляхом змішування порошку ВК6 (60 % за масою) й епоксидної системи з феросиліконом марки «Loctite 3478». Після тверднення МПМ протягом 24 год поверхню піддавали обробленню лазером моделі «Laser Nd-YAG BLS 720» (ROFIN-BAASEL Lasertech, Німеччина) (рис. 1) у режимі оплавлення. Параметри ЛО подані в табл. 1.

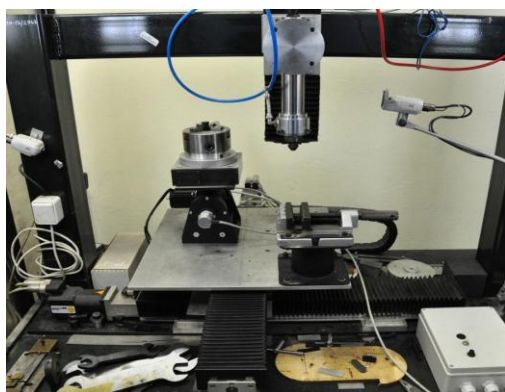


Рис. 1. Лазер Nd-YAG BLS 720

Таблиця 1 – Режими лазерного оброблення

Режим	Подача, мм/хв	Напруга, В	Імпульс лазера, с	Частота, Гц
1	120	500	$0,3 \cdot 10^{-3}$	100
2		500		50
3		500	10^{-3}	50
4		550		50
5		600		50

Металографічні дослідження проведені за стандартною методикою, використовуючи оптичний мікроскоп «Неофот-2». Визначення мікротвердості покриття й її розподілу виконували за допомогою приладу ПМТ-3 під навантаженням 0,05 Н, відповідно до ГОСТ 9450-76. Шорсткість поверхні контролювали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр».

З метою оцінювання гідроабразивної зносостійкості визначали знос за втратою маси зразків через кожні 8 год. Для цього була виготовлена дослідна установка (рис. 2). Зразки фіксували на диску за допомогою тримачів під кутом 45 град, швидкість обертання 120 об/хв. Випробуванням піддавали зразки після оброблення: без покриття; ЕІЛ Т15К6; ЕІЛ Т15К6 + МПМ; ЕІЛ Т15К6 + МПМ + ЛО.

Абразивним матеріалом слугувала водна суміш піску з розміром частинок 0,1-0,5 мм, випробування проводили впродовж 16 і 24 год.

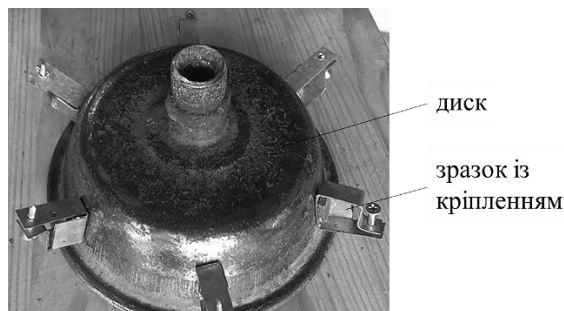
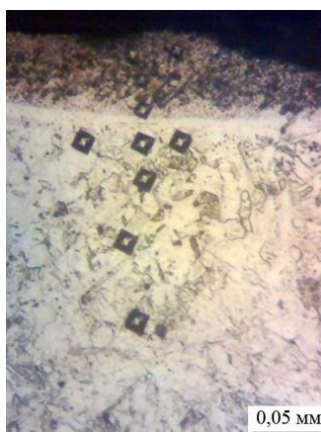


Рис. 2. Закріплення зразків на диску

Джерело: розроблено авторами.

Результати дослідження. Проведений металографічний аналіз зразків після оброблення електродом із твердого сплаву Т15К6 (рис. 3, а). На мікроструктурі можна виділити декілька ділянок. На поверхні формується темний шар, який, очевидно, формується в результаті змішування матеріалу підкладки, легувального електрода й навколишнього середовища, а також осадження твердого сплаву під час ЕІЛ. Під верхнім шаром розташовується перехідна зона, що виникає в результаті дифузії елементів ЕІ і термічного впливу. Основа – підкладка – сталь 12Х18Н10Т, що має аустенітну структуру. На рис. 3, б подані показники отриманого в результаті оброблення шару. Необхідно зазначити, що значення мікротвердості від поверхні поступово зменшуються від свого максимального значення на поверхні (5000...5400 МПа) до основи (1800...2000 МПа). Суцільність покриття, визначена металографічним методом, становила 90 %.



а

Показник	Значення
Мікротвердість, МПа	5000–5400
Товщина, мкм	50
Суцільність, %	90
Шорсткість поверхні, R_z , мкм	37

б

Рис. 3. Мікроструктура після ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 (а)
і показники якості отриманого поверхневого шару (б)

Джерело: розроблено авторами.

З метою визначення впливу лазерного оброблення на формування покриттів, отриманих комбінованою технологією, зразки після ЕІЛ твердим сплавом і нанесення МПМ піддавали дії лазерного променя за режимами, зазначеними в табл. 1.

Металографічний аналіз досліджуваних зразків показав, що покриття має шарувату будову. Перший, приповерхневий шар, другий – підповерхневий, третій – дифузійна зона й матеріал підкладки (рис. 4). Параметри отриманих шарів залежить від режимів ЛО (табл. 3).

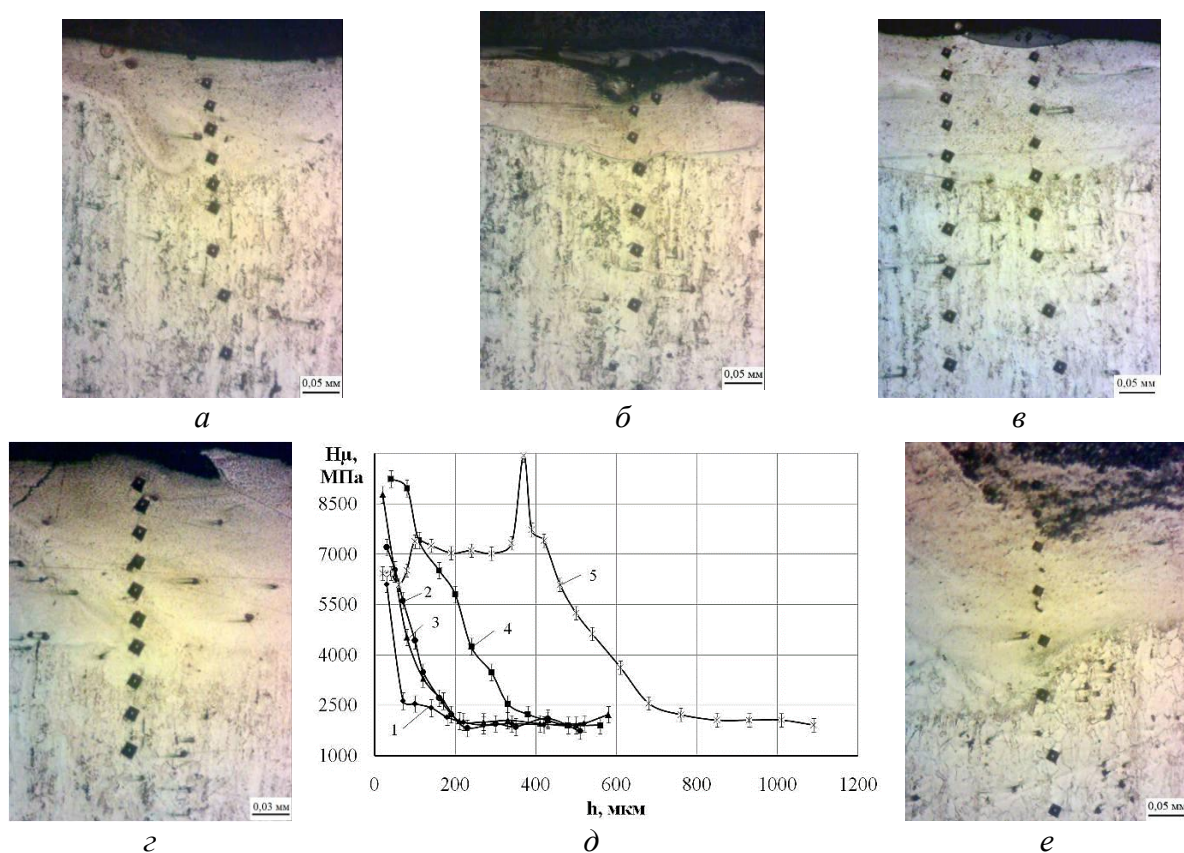


Рис. 4. Мікроструктури та розподіл мікротвердості за глибиною покриття, отриманого за комбінованою технологією за різних режимів ЛО:

a – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *е* – режим 5;

д – розподіл мікротвердості в покритті, отриманого за різних режимів ЛО (1, 2, 3, 4, 5, відповідно, номер режиму)

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Параметри ділянок комбінованого покриття

Режим ЛО	Товщина, мкм	Мікротвердість, МПа	Суцільність, %	Шорсткість поверхні R_a , мкм
1	10 / 100*	6110 / 2650	65 / 100	2,1
2	40 / 130	7200 / 4500	95 / 100	3,3
3	50 / 190	8900 / 6500	95 / 100	6,2
4	100 / 230	9250 / 7250	100 / 100	8,1
5	420 / 260	10000 / 7300	100 / 100	9,0

* – приповерхневий шар / підповерхневий шар.

Мікроструктура покриттів після ЛО за режимом 1 характеризується наявністю тонкого приповерхневого шару (до 10 мкм) з максимальною мікротвердістю 6110 МПа (рис. 4, *a*, *д* – залежність 1). Цей шар відрізняється нерівномірною товщиною та має суцільність близько 65 %. Під ним знаходиться підповерхневий шар, який демонструє знижену травимість у царській горілці, використаний для аналізу мікроструктури, та має твердість до 2650 МПа, середню товщину близько 100 мкм і повну суцільність (100 %). Металог-

рафічний аналіз не виявив чітко вираженого перехідного шару між цими ділянками покриття. Дифузійна зона у мікроструктурі не простежується, що, ймовірно, пояснюється природою підкладки – аустенітною сталлю, яка не зазнає фазових перетворень при нагріванні та охолодженні. Водночас дюрOMETричний аналіз свідчить про відмінну від підкладки твердість дифузійної зони (рис. 4, д), що вказує на протікання дифузійних процесів і зміцнення основного матеріалу.

Під час ЛО за режимом 2 спостерігається збільшення товщини та мікротвердості сформованих у покритті зон (табл. 3). Зовнішній шар досягає максимальної твердості до 7200 МПа, тоді як другий шар має товщину близько 130 мкм і твердість у межах 3200–4500 МПа (рис. 4, д, залежність 2). Обидва шари характеризуються високою суцільністю (до 100 %) та однорідною структурою й товщиною. Зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару під час оброблення за режимом 2 пояснюється зміною параметрів лазерного променя, зокрема зниженням частоти ЛО зі 100 до 50 Гц.

ЛО за режимом 3 спричиняє формування приповерхневого шару товщиною до 50 мкм з максимальною твердістю близько 8900 МПа. Під ним розташовується підповерхневий шар товщиною приблизно 190 мкм і мікротвердістю близько 6500 МПа (рис. 4, в, д – залежність 3). Дослідження підтвердили, що зі збільшенням тривалості імпульсу лазера від $0,3 \times 10^{-3}$ до 10^{-3} с (табл. 1, режими 2 і 3) відбувається зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару (табл. 3).

Металографічні дослідження покриттів, отриманих за режимом 4, показали, що верхній шар має товщину до 100 мкм, максимальну мікротвердість (до 9250 МПа) та повну суцільність (100 %) (рис. 4, з, д – залежність 4). Зі збільшенням напруги від 500 до 550 В (перехід від режиму 3 до режиму 4) спостерігається зростання товщини та мікротвердості шарів. Підповерхневий шар має мікротвердість у межах 6000...7250 МПа, яка поступово зменшується з глибиною. Його середня товщина складає приблизно 230 мкм (табл. 3).

Мікроструктура шару, сформованого за режимом 5, подібна до інших режимів і містить три зони. Найтовщіший зовнішній шар (до 420 мкм) має характерну пористу будову (рис. 4, д) з твердістю в діапазоні 6100...7300 МПа, а окремі ділянки досягають твердості 10 ГПа (рис. 4, д – залежність 5). Підповерхневий шар (до 260 мкм) слабо піддається травленню реактивом, а його максимальна твердість на межі з першою зоною становить 7400 МПа, поступово знижуючись до рівня твердості основного металу.

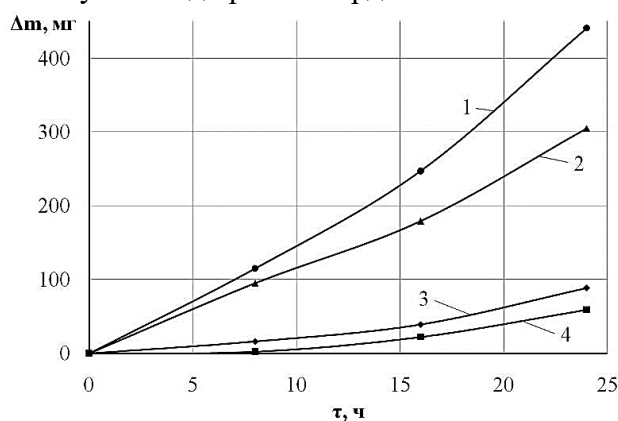


Рис. 5. Залежність абразивного зношування (за втратою маси) від часу випробування зразків:

1 – без покриття; 2 – ЕІЛ твердим сплавом T15K6; 3 – ЕІЛ твердим сплавом T15K6 + МПМ; 4 – ЕІЛ твердим сплавом + МПМ + ЛО за режимом 5

Для оцінки абразивної зносостійкості покриттів були проведені випробування на зношування в абразивному середовищі. Найбільше піддаються зносу зразки, які не зазнавали оброблення (рис. 5). Найвищу стійкість до абразивного зношування продемонструють покриття, отримані за комбінованою технологією: послідовне ЕІЛ твердим сплавом, нанесення МПМ і остаточна ЛО за режимом 5. Лазерне оброблення позитивно впливає на показники абразивної зносостійкості. Під час ЛО відбувається спікання порошкових частинок і затвердіння епоксидної системи, що сприяє збільшенню глибини зміцненого шару. Покриття ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 мають недостатню товщину для тривалої роботи в абразивному середовищі. У покриттях, отриманих лише за технологією ЕІЛ + МПМ, очевидно, міжчастинкові контакти твердого сплаву мають недостатню міцність, оскільки їх зчеплення забезпечується виключно механічним взаємодією з компонентами МПМ.

Висновок. Проведений аналіз методу електроіскрового легування, комбінованих технологій на основі ЕІЛ, що забезпечують підвищення товщини зміцненого шару та абразивної зносостійкості. Отримані та досліджені зразки зі сталі 12Х18Н10Т з покриттями: ЕІЛ твердим сплавом Т15К6; ЕІЛ Т15К6 з подальшим нанесенням МПМ з наступною ЛО за п'ятьма режимами. Застосування ЛО дозволило збільшити товщину покриття до 600 мкм з мікротвердістю 7,3-10,0 ГПа і суцільністю 100 %.

Дослідження зразків із різними покриттями на гідроабразивне спрацювання протягом 24 годин, яке оцінювалося за втратою маси, показало, що покриття, отримане за комбінованою технологією ЕІЛ + МПМ + ЛО (режим 5), має зносостійкість, що перевищує аналогічний показник зразків без покриття у 7,5 раза, а зразків після лише ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 – у 5 разів.

Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проєкту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. No 0124U000539, Сумський державний університет).

Список використаних джерел

1. Narayanaswamy, B., Hodgson, P., Timokhina, I., & Beladi, H. (2016). The Impact of Retained Austenite Characteristics on the Two-Body Abrasive Wear Behavior of Ultrahigh Strength Bainitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(10), 4883–4895. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3690-5>.
2. Rajput, A. S., & Das, S. (2025). Abrasive wear behaviour of continuously cooled carbide-free bainitic steel. *Wear*, 205951. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205951>.
3. Gupta, B. R. (2023). 3 - Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. *Tribology and Surface Engineering, Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, 51-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>.
4. Pawlowski, L. (2025). Physical Deposition Methods for Films and Coatings. <https://doi.org/10.1002/9781119713128>.
5. Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2019). Microstructures, Heat Treatment, and Properties of Boron-Alloyed Tool Steels. *Steel research international*, 91(5), 1900416. <https://doi.org/10.1002/srin.201900416>.
6. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>.
7. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. (2024). Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. *Bulletin of the polish academy of sciences: technical sciences*, 72 (5), 1-8. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>.

8. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12(10), 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
9. Radek, N., Pietraszek, J., Gądek-Moszczak, A., Orman, Ł. J., & Szczotok, A. (2020). The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*, 13(10), 2331. <https://doi.org/10.3390/ma13102331>.
10. Abdi, F., Aghajani, H., Taghizadeh Tabrizi, A., Nasimi, L., & Fazli Shokouhi, F. (2023). Study on the effect of the crack closing of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy electro-spark deposited coating by plasma nitriding on the corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5), 171629. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171629>.
11. Tarel'nik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Konoplyanchenko, E. V., & Antoshevskii, K. (2017). Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(3), 285-294. <https://doi.org/10.3103/s1068375517030140>.
12. Johnson, R. N. (1995). Electro-spark deposited coatings for high temperature wear and corrosion applications. *Elevated Temperature Coatings: Science and Technology*; ed. by N.B. Dahotre, J.M. Hampikian, and J.J. Stiglich. Warrendale, PA: The Minerals, Metals, and Materials Society, 265-275.
13. Коновал, В. П., Уманський, О. П., Панасюк, А. Д., Подчерняєва, І. О., & Коваль, О. Ю. (2009). Формування електроіскрових покриттів із композиційних матеріалів на основі карбіду і дибориду титану-хрому. *Надтверді матеріали*, (4), 84-91.
14. Ruizhu, Z., Jingrui, L., Dakao, Y., & Yuanyuan, Z. (2015). Mechanical Properties of WC-8Co Wear-Resistant Coating on Pump Impellers Surface by Electro-Spark. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(7), 1587-1590. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(15\)30097-7](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(15)30097-7).
15. Mihailov, V., Kazak, N., Ivashcu, S., Ovchinnikov, E., Baci, C., Ianachevici, A., Rukuiza, R., & Zunda, A. (2023). Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials. *Coatings*, 13(3), 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>.
16. Radek, N., & Bartkowiak, K. (2010). Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*, 5, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>.
17. Antoszewski, B., & Tarelnyk, V. (2014). Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 301-307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.301>.
18. Radek, N., Bronček, J., Fabian, P., Pietraszek, J., & Antoszewski, K. (2015). Properties of the Electro-Spark Deposited Coatings - Technology and Applications. *Materials Science Forum*, 818, 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.818.61>.
19. Tarel'nik, V. B., Konoplyanchenko, E. V., Kosenko, P. V., & Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7-8), 540-546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
20. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Sarzhanov, A., Pavlov, A., Gerasimenko, V., & Sarzhanov, B. (2017). Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012050>.
21. Тарельник, В., Марцинковський, В., & Павлов, О. (2017). Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (Патент № 115676).
22. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Тарельник Н.В., Павлов О.Г., Саржанов Б.О., & Антошевський Б. (2019). Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі (Патент № 131805).

References

1. Narayanaswamy, B., Hodgson, P., Timokhina, I., & Beladi, H. (2016). The Impact of Retained Austenite Characteristics on the Two-Body Abrasive Wear Behavior of Ultrahigh Strength Bainitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(10), 4883-4895. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3690-5>.

2. Rajput, A. S., & Das, S. (2025). Abrasive wear behaviour of continuously cooled carbide-free bainitic steel. *Wear*, 205951. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205951>.
3. Gupta, B. R. (2023). 3 - Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. *Tribology and Surface Engineering, Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, 51-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>.
4. Pawlowski, L. (2025). Physical Deposition Methods for Films and Coatings. <https://doi.org/10.1002/9781119713128>.
5. Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2019). Microstructures, Heat Treatment, and Properties of Boron-Alloyed Tool Steels. *Steel research international*, 91(5), 1900416. <https://doi.org/10.1002/srin.201900416>.
6. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>.
7. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. (2024). Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. *Bulletin of the Polish academy of sciences: Technical sciences*, 72 (5), 1-8. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>.
8. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12(10), 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
9. Radek, N., Pietraszek, J., Gądek-Moszczak, A., Orman, Ł. J., & Szczotok, A. (2020). The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*, 13(10), 2331. <https://doi.org/10.3390/ma13102331>.
10. Abdi, F., Aghajani, H., Taghizadeh Tabrizi, A., Nasimi, L., & Fazli Shokouhi, F. (2023). Study on the effect of the crack closing of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy electro-spark deposited coating by plasma nitriding on the corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5), 171629. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171629>.
11. Tarelnyk, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Konoplyanchenko, E. V., & Antoshevskii, K. (2017). Electric-spark coatings on the steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(3), 285-294. <https://doi.org/10.3103/s1068375517030140>.
12. Johnson, R. N. (1995). Electro-spark deposited coatings for high temperature wear and corrosion applications. *Elevated Temperature Coatings: Science and Technology*; ed. by N.B. Dahotre, J.M. Hampikian, and J.J. Stiglich. Warrendale, PA: The Minerals, Metals, and Materials Society, 265-275.
13. Konoval, V. P., Umanskyi, O. P., Panasiuk, A. D., Podcherniaieva, I. O., Koval, O. Yu. (2009). Formuvannia elektroiskrovnykh pokryttiv iz kompozytsiynykh materialiv na osnovi karbidu i dyborydu tytanu-khromu [Formation of electrospark coatings from composite materials based on titanium-chromium carbide and diboride]. *Nadtverdi materialy*, 4, 84-91.
14. Ruizhu, Z., Jingrui, L., Dakao, Y., & Yuanyuan, Z. (2015). Mechanical Properties of WC-8Co Wear-Resistant Coating on Pump Impellers Surface by Electro- Spark. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(7), 1587-1590. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(15\)30097-7](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(15)30097-7).
15. Mihailov, V., Kazak, N., Ivashcu, S., Ovchinnikov, E., Baci, C., Ianachevici, A., Rukuiza, R., & Zunda, A. (2023). Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials. *Coatings*, 13(3), 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>.
16. Radek, N., & Bartkowiak, K. (2010). Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*, 5, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>.
17. Antoszewski, B., & Tarelnyk, V. (2014). Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 301-307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.301>.
18. Radek, N., Bronček, J., Fabian, P., Pietraszek, J., & Antoszewski, K. (2015). Properties of the Electro-Spark Deposited Coatings - Technology and Applications. *Materials of the Science Forum*, 818, 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.818.61>.

19. Tarel'nik, V. B., Konoplyanchenko, E. V., Kosenko, P. V., & Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7-8), 540–546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
20. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Sarzhanov, A., Pavlov, A., Gerasimenko, V., & Sarzhanov, B. (2017). Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012050>.
21. Tarelnyk, V., Martsynkovskiy, V., & Pavlov, O. (2017). Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon metalevykh detalei [Method for restoring worn surfaces of metal parts] (Patent № 115676).
22. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Haponova O.P., Tarelnyk N.V., Pavlov O.H., Sarzhanov B.O., & Antoshevskiy B. (2019). Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon detalei mashyn z nerzhaviuchoi stali [Method for restoring worn surfaces of stainless steel machine parts] (Patent № 131805).

Отримано 05.03.2025

UDC 669.14.018.29:669.11

**Oksana Haponova¹, Viacheslav Tarelnyk², Natalia Tarelnyk³,
Gennadiy Laponog⁴, Dmytro Torhachov⁵**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. Researcher ID: [56938828500](https://orcid.org/56938828500)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Technical Service and Industrial Engineering Department
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: tarelnyk@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2005-5861>. Researcher ID: [56436591000](https://orcid.org/56436591000)

³PhD in Economics, Associate Professor of the Technical Systems Design Department
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: natasha-tarelnik@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. Researcher ID: [57195836961](https://orcid.org/57195836961)

⁴Postgraduate student of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: glaponog@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

⁵Student of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: torgachovdmitriy@gmail.com

INCREASING THE HYDROABRASIVE WEAR RESISTANCE OF SURFACES BY COMBINED METHODS BASED ON ELECTROSPARK ALLOYING AND LASER TREATMENT

Combined technologies based on electrospark alloying (ESA), such as sequential ESA followed by laser treatment (LT), are used to improve ESA and increase efficiency of the process. Development of integrated methods for synthesis of coatings is relevant because it allows the quality of the surface layers to be improved and the service life of critical machine parts to be extended. In the literature, combination of electrical impact on the surface with subsequent application of metal-polymer materials (MPM) is proposed. The ESA + MPM technology makes it possible to obtain the required height of micro-irregularities (roughness), and subsequent cutting allows different ratio of the areas of applied metal and MPM. However, this technology has disadvantages. To overcome them, a new method of surface treatment is proposed. The aim of this paper is to study the structure and properties of combined coatings on steel obtained by sequential ESA, MPM application reinforced with VK6 powder, followed by LT in different modes. After machining, specimens were subjected to surface roughness determination, metallographic studies, microhardness distribution and abrasive wear resistance tests. Special set-up was designed to determine the abrasive wear resistance. The metallographic analysis showed that samples after combined treatment have a layered structure. The surface layer has the highest hardness of 6100-7300 MPa and in some areas up to 10 GPa. The outer layer is up to 420 μm thick. The sub-surface layer (up to 260 μm) is poorly etched by the reagent and has maximum hardness of 7400 MPa. Tests on abrasive wear showed that the untreated specimens suffered the most wear. The coatings obtained by the combined technology demonstrated the highest resistance: sequential ESA with a hard alloy, MPM application and final LT, and has wear resistance that exceeds the same indicator of uncoated samples by 7.5 times. Therefore, the technology studied for obtaining combined coatings can be recommended to increase thickness of the wear resistant coating and to ensure abrasive wear resistance of surfaces.

Keywords: electrospark alloying; laser treatment; microstructure; abrasive wear resistance; coating.

Fig.: 5. References: 22.

Гапонова О. П., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Лапоног Г. П., Торгачов Д. В. Підвищення гідроабразивної зносостійкості робочих поверхонь комбінованими методами на основі електроіскрового легування і лазерного оброблення. *Технічні науки та технології*. 2025. № 1(39). С. 22-31.