

Оксана Петрівна Гапонова¹, Наталія В'ячеславівна Тарельник²

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>. **Researcher ID:** 56938828500

²кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

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

ОЦІНКА ЖАРОСТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Проведені дослідження з визначення жаростійкості покриттів на сталях, отриманих методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Випробування показали, що під час високотемпературних експериментів вони не поступаються дифузійним покриттям. Дослідження першої серії зразків зі сталі 20 після алітування методом ЕІЛ показали, що зміни їх маси при високотемпературній витримці близькі за значенням до покриттів, отриманих в розплаві алюмінію. Металографічним аналізом визначено, що ЕІЛ покриття захищають сталь від окиснення. Дослідження другої і третьої серій зразків (сталей 06Х12НЗДЛ і 12Х18Н10Т) після ЕІЛ показав, що найкращі показники жаростійкості мають покриття після алітування і двошарові покриття Al і ніхром. Розроблені покриття рекомендовані як жаростійкі.

Ключові слова: електроіскрове легування; жаростійкість; покриття; алітування.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Підвищення робочих температур деталей енергетичного обладнання і газових турбін у поєднанні зі зниженням якості використовуваного палива привело до широкого використання технологій модифікації поверхні з метою забезпечення збільшення терміну служби. Відомі методи синтезу дифузійних алюмовмісних покриттів [1]. Проте технології хіміко-термічного оброблення мають значні недоліки, такі як значна тривалість процесу насичення, громіздке обладнання, нагрів всієї деталі, енергоємність, не екологічність тощо. Ці недоліки сприяли розвитку нових методів модифікації поверхні, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії та речовини. Найбільш затребуваним і простим методом з точки зору промислової реалізації є електроіскрове легування (ЕІЛ). Є низка вагомих публікацій, у яких відображені фізична сутність ЕІЛ, використовувані матеріали, особливості формування структури модифікованого шару [2-4] тощо. Однак у більшості випадків, метод ЕІЛ застосовується для формування твердих зносостійких і м'яких припрацювальних покриттів, тобто з особливими триботехнічними властивостями, або для відновлення зношених поверхонь. Питання використання електроіскрових захисних корозійностійких чи/або жаростійких покриттів є відкритим і потребує подальшого дослідження.

Постановка проблеми. Покриття на основі Cr, Al і Si, як окремо, так і в комбінації, відомі давно і використовують їх для підвищення стійкості матеріалів до високотемпературної корозії, включаючи високотемпературне окиснення і гарячу корозію, ерозію, ерозійно-корозійну взаємодію, знос і термічну деградацію. Покриття з високим вмістом алюмінію є найбільш широко використовуваними. Значна частина ранніх розробок цих покриттів була пов'язана з авіаційною промисловістю. На відміну від сплавів на основі нікелю, алюмінієві покриття на залізних системах, таких як жароміцні аустенітні нержавіючі сталі, є набагато менш вивченими.

Насьогодні достатньо велика кількість динамічного обладнання, такого як турбонасосні і турбокомпресорні агрегати та турбіни, працюють у надважких умовах, підвищених температурах, тисках, опроміненні тощо, від матеріалу яких вимагається стійкість до високотемпературної корозії. Основним матеріалом для їх виготовлення є сталі, жароміцні нержавіючі сталі аустенітного і перехідних класів, завдяки їхній чудовій високотемпературній міцності та технологічності при кімнатній температурі.

Таким чином, останнім часом алітування сплавів на основі заліза отримало новий імпульс [5], як засіб покращення високотемпературної корозійної стійкості матеріалів, які можуть бути використані в багатьох галузях енергетики. Хоча алюмінієві покриття достатньо широко використовуються у промисловості, поточний дослідницький інтерес до захисних покриттів зосереджений на вивченні покриттів і вдосконаленні методів їх синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [6], що з метою надання залізовуглецевим сплавам підвищення окалиностійкості, опору атмосферній корозії і ряду інших властивостей застосовують алітування. Крім того, покриття на основі алюмінію характеризуються високою температурою плавлення, низькою щільністю, високим модулем пружності, жароміцністю, стійкістю до окислення і займання [7].

Корозія алюмінію та його сплавів була широко вивчена в різних середовищах: атмосферна корозія, кислоти, хлориди тощо. Чистий алюміній (99 % або вище) має дуже хорошу стійкість до атмосферної корозії та підходить для захисного анодування [8]. Оскільки алюміній є анодом до сталі, він захищатиме її від гальванічних впливів у морській воді [9].

Для отримання алюмінієвих покриттів на сталевих підкладках використовується велика кількість методів. Тонкі покриття на основі Al зазвичай виготовляються методами PVD, IBAD або методами напилення [10-12]. Дифузійні методи використовуються для отримання більш товстих покриттів (до кількох сотень мкм). Такі методи використовувалися декількома авторами для різних цілей, серед яких захист від корозії в солоних або морських середовищах [13]. Крім того, авторами [14] показано, що корозійна стійкість алітованих покриттів краща, якщо товщина покриттів збільшується. Однак методи хіміко-термічного оброблення мають значні недоліки, що обмежують їх використання в промисловості.

Алюмінієві покриття на сталевих підкладках мають великий інтерес через утворення сполук Fe–Al, які виявляють дуже цінні властивості: хороші механічні властивості, низьку щільність і доступність сировини з хорошою стійкістю до корозії та окислення [15; 16]. Покриття на основі інтерметалевих сполук Fe–Al є перспективними для використання в середовищах із високими температурами через їхню високу жаростійкість і низьку собівартість.

Отримання доброго металевого контакту між сталлю і алюмінієвими сплавами ускладняється великою спорідненістю алюмінію до кисню і значною міцністю окису алюмінію (Al_2O_3), про що свідчить теплота утворення цієї сполуки, що дорівнює 400 ккал/моль. Однак основною перешкодою є хімічна взаємодія цих металів, що приводить до необоротного утворення інтерметалевих сполук по лінії переходу. Тому вивчення впливу режимних параметрів поверхневої обробки на якість покриття становить значний інтерес.

Перспективним методом поверхневого модифікування є електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними і трибологічними властивостями. Перевагою ЕІЛ є екологічна безпека процесу, висока міцність зчеплення легованого шару і матеріалу основи, можливість нанесення на зміцнювальну поверхню будь-яких струмопровідних матеріалів, низька енергоємність процесу, простота виконання технологічної операції [17]. Електроіскрове легування, володіючи широкими можливостями формування в поверхнях певної структури, фазового та хімічного складу, дозволяє поліпшити їх експлуатаційні властивості.

Процес ЕІЛ екологічно чистий і безпечний, тому що здійснюється при напрузі 20-100 В і тривалості імпульсних розрядів 10^{-6} – 10^{-3} с. При цьому товщина формованих шарів з твердих сплавів становить $\sim 0,01$ – $0,15$ мм, а з пластичних і більш легкоплавких матеріалів шар покриття може досягати $\geq 0,3$ – $0,5$ мм. У зоні розряду електроерозія, масоперенесення матеріалу електродів (у паровій, рідкій і твердій фазах), кристалізація та інші явища протікають у дуже нерівноважних умовах, що сприяють утворенню структур

з дрібним зерном, високою щільністю дислокацій, з особливим напружено-деформованим станом, певними фізико-хімічними властивостями. Змінюючи параметри і умови ЕІЛ, можна регулювати мікрометалургійні процеси в цій зоні, проводити спрямований синтез тугоплавких і інших хімічних сполук і формувати складні композиційні покриття з інтерметалідів, карбідів, нітридів, оксидів як за рахунок матеріалів електродів, так і елементів міжелектродного середовища.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри незаперечні переваги електроіскрового легування, використання деталей, оброблених іскровим імпульсом, у промисловості недостатньо широке. Застосування цього способу в машинобудуванні стримується відсутністю довідкового матеріалу щодо оптимізації режимів оброблення, вибору електродного матеріалу й визначенні галузі раціональної експлуатації оброблених поверхонь. У процесі ЕІЛ бере участь легуючий електрод (анод), що обробляє поверхню деталі (катод) і міжелектродне середовище, варіюючи якими стає можливим цілеспрямоване керування формуванням експлуатаційних властивостей.

Метою статті є оцінка жаростійкості електроіскрових покриттів, що містять алюміній, отриманих на сталях.

Методика досліджень. Як основу використовували зразки зі сталей 20, 12Х18Н10Т і 06Х12НЗДЛ розміром 15×15×8 мм, на які наносили алюмінієві покриття методом ЕІЛ на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А». В якості електродів використовували стрижні з алюмінієвого дроту марки СвА99 – діаметром 4 мм, нікелю – Ø 3 мм, ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) – Ø 3,5 мм, хрому – Ø 3 мм.

Легування здійснювалося на різних режимах, кожному з яких відповідає своя енергія розряду і продуктивність – площа сформованого покриття в одиницю часу (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду [18]

Енергія розряду (W_p), Дж	0,05	0,13	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, $см^2 / хв$	0,4-0,6	0,7-0,9	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

У роботі проведені дослідження з оцінки жаростійкості алітованих покриттів, отриманих ЕІЛ. Досліджувалися три серії зразків:

– перша серія – зразки зі сталі 20, ЕІЛ шари отримували за два проходи, спочатку з енергією розряду $W_p = 2,6$ Дж і продуктивністю $1,8$ $см^2 / хв$, а потім, з $W_p = 1,3$ Дж і продуктивністю $0,8$ $см^2 / хв$. Як показали дослідження, після такої обробки формуються якісні покриття (суцільність 100 %) з низькою шорсткістю [18];

– друга серія – зразки зі сталі 12Х18Н10Т. Одношарові покриття Al, Ni, Cr і ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) виконували у три проходи ЕІЛ, поступово зменшуючи енергію розряду: перший прохід при $W_p = 0,52$ Дж, другий при $0,13$ Дж і третій при $0,05$ Дж, забезпечуючи максимальну суцільність покриття (100 %) і мінімальну шорсткість на рівні $Ra = 0,7-0,9$ мкм. Двошарові покриття ЕІЛ Al + ЕІЛ Ni виконували у послідовності: ЕІЛ Al при $W_p = 0,52$ Дж, наступний шар ЕІЛ Ni при $W_p = 0,13$ Дж. Двошарові покриття ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) виконували у послідовності: ЕІЛ Al при $W_p = 0,52$ Дж, другий шар ЕІЛ ніхром (80%Ni+20%Cr) при $W_p = 0,13$ Дж. Для зменшення шорсткості поверхні після формування двошарових покриттів виконували ЕІЛ алюмінієвим електродом при енергії розряду $0,05$ Дж до шорсткості $Ra = 0,7-0,9$ мкм.

– третя серія – зразки зі сталі 06Х12НЗДЛ. ЕІЛ виконували у тій самій послідовності, використовуючи подібні режими, що і на сталі 12Х18Н10Т.

Випробування на жаростійкість першої серії зразків проводили відповідно до стандарту (ГОСТ 6130-71. Метали. Методи визначення жаростійкості), який визначає методи дослідження жаростійкості в умовах впливу газових середовищ і повітря при високих

температурах. Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом 50 годин при постійній температурі 980°C, ваговим методом по зміні маси зразків. При випробуванні на жаростійкість забезпечували рівномірне омивання поверхні зразків газовим середовищем, зразки розміщували в печі в керамічних тиглях. Перед випробуванням зразки були просушені і зважені на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,1$ мг. Поверхня зразків знежирювалася. Також вимірювалася площа їх поверхні. Лінійні розміри визначали мікрометром. Після цього зразки в тиглях з окису алюмінію поміщали в піч. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі. Нагрівання зразків проводилося в електричній печі опору (температура контролювалася термопарою). Жаростійкість сплаву визначали по зміні ваги зразка після кожних 3-7 годин витримки в печі, віднесеного до його площі поверхні. Збільшення маси зразка визначалося за різницею результатів зважування холодного зразка до і після витримки в печі.

Оцінювання жаростійкості проводили за збільшенням маси зразка за певний період часу на одиницю площі K , г/м²:

$$K = \frac{\Delta m}{S},$$

де Δm – втрата маси зразка при випробуванні, г;

S – загальна площа поверхні зразка, м².

Випробування на жаростійкість другої і третьої серії зразків проводили шляхом визначення зміни маси зразків до і після випробування, розміри яких були однакові для всіх методів обробки (15×15×8 мм). Таким чином, визначали абсолютне значення зміни мас зразків. Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом 10 годин при постійній температурі 950 °С. Перед випробуванням зразки були просушені і зважені на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,1$ мг. Поверхня зразків знежирювалася. Після цього зразки в тиглях з окису алюмінію поміщали в піч. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі. Нагрівання зразків проводилося в електричній печі опору (температура контролювалася термопарою). В якості показника жаростійкості використовували абсолютне значення зміни мас зразків до і після випробування. Зміни маси зразка контролювали кожних 10 годин витримки в печі. Збільшення маси зразка визначалося за різницею результатів зважування холодного зразка до і після витримки в печі.

Для порівняння показників жаростійкості, зразки із досліджуваних сталей піддавали класичному алітуванню – у розплаві алюмінію відповідно до [19], і без покриття.

Шорсткість поверхні зразків досліджували на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Металографічний аналіз покриттів після випробування на жаростійкість виконували за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, до і після травлення. Суцільність нанесених покриттів визначали металографічним методом.

Результати дослідження. У роботі [18] авторами досліджений структурний стан алітованих покриттів на конструкційних сталях 20 і 40. Металографічним, локальним мікрорентгеноспектральним і дюрOMETричним аналізами виявлено, що на поверхні формується «білий шар» – шар, що не піддається травленню звичайними реактивами, він насичений алюмінієм і має підвищену твердість близько 7400 МПа, залежно від енергії розряду. Під білим шаром розташовується дифузійна зона, у якій вміст алюмінію поступово зменшується до хімічного складу основи. Перевага ЕІЛ покриттів у тому, що вони мають добрий адгезійний зв'язок з основним матеріалом, вони не відшаровуються, а міцно зчеплені з підкладкою. Як показали дослідження, алітований шар має товщину 30-70 мкм на сталі 20, і 30-130 мкм на сталі 40. Важливим параметром структури є суцільність покриття. При енергіях розряду 2,6 Дж і більше отримані покриття із суцільністю 100 %.

Аналіз діаграми стану залізо-алюміній показує [16], що в ЕІЛ-шарі ймовірно формування інтерметалідів, що підтверджується високою твердістю покриття. Також не можна виключати формування нітридів і оксидів, оскільки електроіскрове легування здійснювалося на повітрі. Дуже ймовірні невеликі обсяги чистого матеріалу електрода. У роботі [20] авторами визначений фазовий склад алітованих покриттів на сталях 20 і 40. При енергіях розряду, що приводять до формування суцільного покриття, формується фаза з моноклінною структурою – $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ (12 просторова група) і осаджується чистий алюміній (225 просторова група). Очевидно, поява інтерметалідних фаз і сприяє збільшенню твердості покриття зі збільшенням енергії розряду, а також, очевидно і жаростійкості.

Як було визначено, алітовані покриття забезпечують залізобуглецевим сплавам підвищену жаростійкість. Випробування зразків зі сталі 20, проведені на повітрі при температурі 980 °С протягом 50 годин показали, що ЕІЛ покриття характеризуються високою жаростійкістю, навіть дещо вищою, ніж після класичної технології алітування в розплаві, що дає можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах (рис. 1).

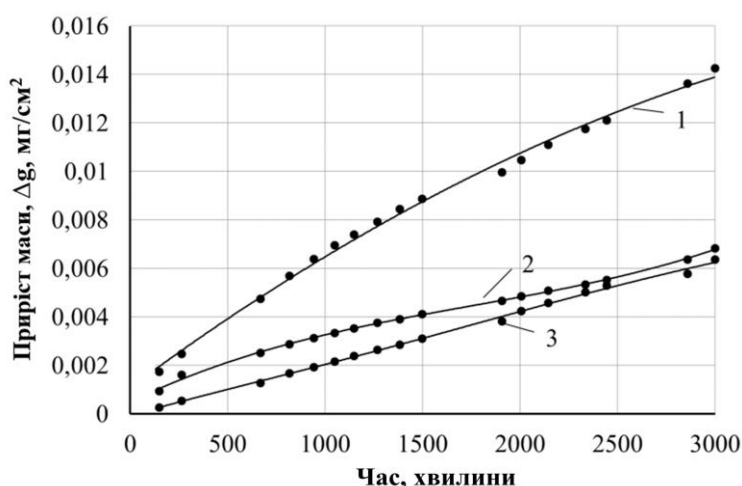


Рис. 1. Жаростійкість алітованих покриттів на сталі 20 (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год):

1 – без покриття; 2 – алітування методом ЕІЛ; 3 – алітування в розплаві алюмінію
Джерело: розроблено авторами.

Проведені металографічні дослідження характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість. На всіх зразках спостерігається наявність оксидних включень, особливо інтенсивно окислились зразки без захисного покриття (рис. 2, а). Поверхневий шар після рідинного алітування крім дифузійної зони містить на поверхні зону з алюмінію, що залишився після припинення процесу алітування. Після випробування на жаростійкість (рис. 2, б) спостерігається окиснення металу під покриттям, про що свідчить наявність окисного прошарку, який відділяє поверхневий шар і основу. Очевидно, подібний характер руйнування покриття і, отже, окиснення основного металу призводить до збільшення маси зразків при високотемпературних випробуваннях.

На зразках з алітованим покриттям, отриманим методом ЕІЛ, спостерігається зменшення товщини «білого» шару (рис. 2, в), отже при високотемпературних випробуваннях відбувається руйнування поверхнього шару, і зміна маси пов'язана з фізико-хімічними процесами, що відбуваються переважно в поверхневому шарі, а не в основному металі. Поверхневий алітований шар, що складається з інтерметалідів заліза і алюмінію, а також чистого алюмінію надійно захищає сталь від окиснення під час випробування на жаростійкість.

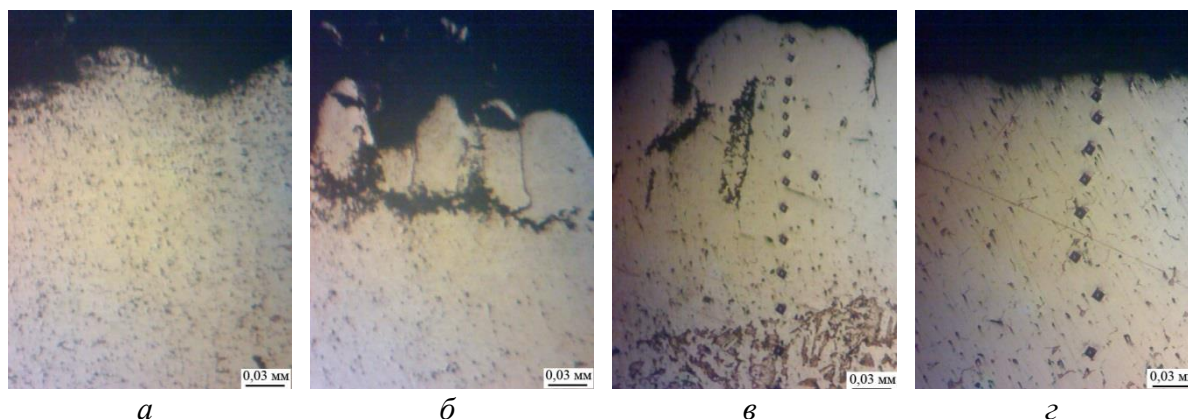


Рис. 2. Мікроструктури алітованих покриттів на сталі 20 після випробування на жаростійкість (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год):
а – без покриття (нетравлений шліф); *б* – алітування в розплаві алюмінію (нетравлений шліф); *в* – алітування в розплаві алюмінію (після травлення в 3-5 % розчині HNO₃);
г – алітування методом ЕІЛ (після травлення у 3-5 % розчині HNO₃)
 Джерело: розроблено авторами.

Визначені абсолютні значення зміни мас зразків сталей 06X12H3ДЛ і 12X18H10Т після випробування на жаростійкість при температурі 950 °С впродовж 100 годин (рис. 3). Так само, як і на сталі 20 визначено, що електроіскрові покриття на рівні дифузійних захищають сталь від окиснення. Варто відмітити, що найкращі показники мають покриття, що містять алюміній – ЕІЛ Al, тобто алітування методом ЕІЛ, і ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr), тобто багатошарове ЕІЛ покриття, що нанесене послідовно шар алюмінію і наступний шар із ніхрому. Очевидно, що створювані в покритті під час ЕІЛ фази забезпечують надійний захист сталі від високотемпературного окиснення. Також слід враховувати якість покриттів. Режими обробки обрані таким чином, щоб забезпечувати максимальну суцільність покриття у поєднанні з мінімальною шорсткістю. Порівняно зі зразками без покриття алюмінійвмісні ЕІЛ покриття мають на більше ніж 90 % менший приріст маси, що свідчить про ефективний захист поверхні сталі від високотемпературного окиснення. Отже, розроблені покриття можна рекомендувати як жаростійкі.

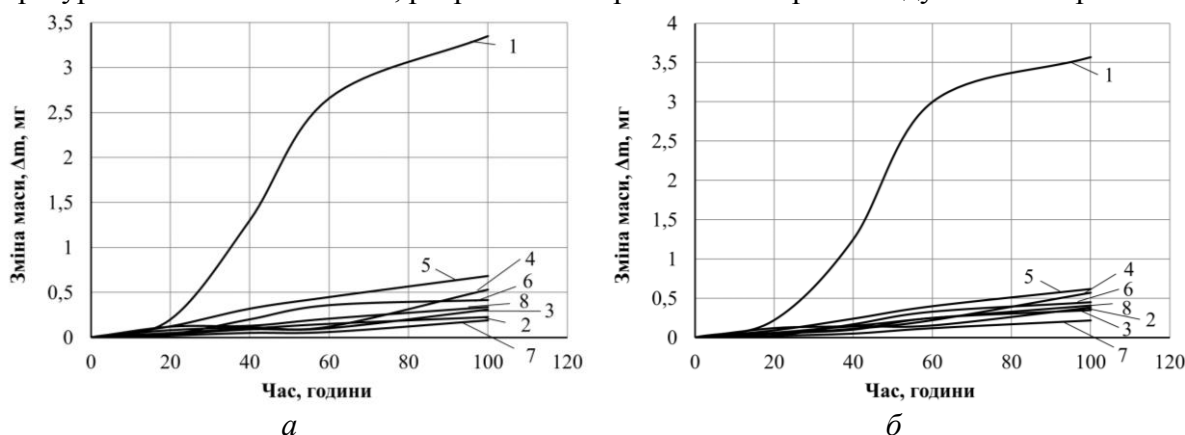


Рис. 3. Зміна маси зразків зі сталі 06X12H3ДЛ (*а*) і сталі 12X18H10Т (*б*) під час випробування на жаростійкість при температурі 950 °С впродовж 100 годин. Покриття на зразках:
1 – без покриття; *2* – традиційне в розплаві Al; *3* – ЕІЛ Al; *4* – ЕІЛ Ni;
5 – ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr); *6* – ЕІЛ Al + ЕІЛ Ni;
7 – ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr); *8* – ЕІЛ Cr

Джерело: розроблено авторами.

Висновок. Дослідження жаростійкості електроіскрових алітованих покриттів на сталях показали, що під час високотемпературних випробувань вони не поступаються дифузійним. Дослідження першої серії зразків – сталі 20 після алітування методом ЕІЛ, що забезпечують 100 % суцільність показали, що втрата маси складає близько 0,007 мг/см² під час випробування при 980 °С впродовж 50 годин і близько за значенням до покриттів, отриманих в розплаві алюмінію. Проведений металографічний аналіз характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість показав, що після високотемпературної витримки основний метал окиснюється, про що свідчить наявність оксидів в поверхневому шарі. Особливо інтенсивно окиснюються зразки без захисного покриття. Алітовані покриття, отримані в розплаві алюмінію і методом ЕІЛ, захищають від окиснення основний метал, про що свідчить менший вміст оксидів в при поверхневому шарі основного металу. Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах.

Дослідження другої і третьої серій зразків (сталей 06X12H3ДЛ і 12X18H10Т) після поверхневої обробки показав, що абсолютні значення зміни мас зразків сталей з покриттями, що містять алюміній – ЕІЛ Al, тобто алітування методом ЕІЛ, і ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr), тобто з багат шаровим ЕІЛ покриттям, після випробування на жаростійкість при температурі 950 °С впродовж 100 годин, на більше ніж 90 % менші, порівняно зі зразками без покриття, що свідчить про ефективний захист поверхні сталі від високотемпературного окиснення. Отже, розроблені покриття можна рекомендувати як жаростійкі.

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

Список використаних джерел

1. Bahadur, A. Aluminum Coatings for Steel / A. Bahadur // Materials and Manufacturing Processes. – 1996. – Vol. 11(2). – Pp. 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426919608947476>.
2. Tarel'nyk, V. B. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – Pp. 147–156.
3. Antoszewski B. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method / B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T.I. Zhylenko, I. Konoplianchenko // Materials. - 2021. – No. 14. – P. 739. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14040739>.
4. Barile, C. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review / Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, G. Renna // Coatings. – 2022. – No 12. – P. 1536. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
5. Tarel'nyk, V. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying / V. Tarel'nyk, O. Haponova, N. Tarel'nyk., O. Myslyvchenko // Uspekhi Fiziki Metallov. – 2023. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 282–318. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>.
6. Борисова, А. Л. Дифузійні жаростійкі покриття для нержавіючої та вуглецевої сталей / А. Л. Борисова, Н. І Капорік, Т. В. Цимбаліста, М. А. Васильківська, М. А. Васильковская // Автоматическая сварка. – 2019. – № 10. – С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.10.04>.
7. Brochu, M. Heard development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process / M. Brochu, J.G. Portillo, J. Milligan and D.W. Heard // The Open Surface Science Journal. – 2011. – No 3. – Pp. 105–114.

8. Bailey, J.C. Aluminum and Aluminum Alloys / J. C. Bailey, F. C. Porter, A. W. Pearson, R. A. Jarman // Corrosion: Metal/Environment Reactions / Edited by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein. – Third edition. – Butterworth Heinemann, 1994.
9. Wood, R.J.K. Erosion–corrosion of candidate HVOF aluminium-based marine coatings / R. J. K. Wood, A. J. Speyer // Wear. – 2004. – Vol. 256 (5). – Pp. 545-556. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00564-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00564-7).
10. Zhang Bo Electrochemical corrosion behaviour of microcrystalline aluminium in acidic solutions / Bo Zhang, Ying Li, Fuhui Wang // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49 (5). – Pp. 2071-2082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.11.006>.
11. Charrier C. Aluminium and Ti/Al multilayer PVD coatings for enhanced corrosion resistance / C. Charrier, P. Jacquot, E. Denisse, J. P. Millet, H. Mazille // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 90 (1–2). – Pp. 29-34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)03080-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03080-0).
12. Mehmood, M. The effect of heat treatment on the corrosion behavior of sputter-deposited aluminum–chromium alloys / M. Mehmood, E. Akiyama, H. Habazaki, A. Kawashima, K. Asami, K. Hashimoto // Corrosion Science. – 1998. – Vol. 41 (3). – Pp. 477-499. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00130-9).
13. Fatma Ahnia. Evaluation of aluminum coatings in simulated marine environment / Fatma Ahnia, Boualem Demri // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 220. – Pp. 232-236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.011>.
14. Han Min-Su Effects of thickness of Al thermal spray coating for STS 304 / Min-Su Han, Yong-Bin Woo, Seok-Cheol Ko, Young-Jae Jeong, Seok-Ki Jang, Seong-Jong Kim // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2009. – Vol. 19 (4). – Pp. 925-929. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60379-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60379-9).
15. Deevi, S. C. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications / S. C. Deevi, V. K. Sikka // Intermetallics. – 1996. – Vol. 4 (5). – Pp. 357-375. DOI: [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9).
16. Matysik, P. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Microstructures and Mechanical Properties / P. Matysik, S. Józwiak, T. Czujko // Materials. – 2015. – № 8(3). – Pp. 914-931. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma8030914>.
17. Wang, J. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review / J. Wang, M. Zhang, S. Dai, L. Zhu // Coatings. – 2023. – № 13. – Pp. 1473-1497. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>.
18. Kirik, G. V. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, B. Antoszewski // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. – Vol. 56. – Pp. 688–696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.
19. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: монография / А. Н. Минкевич. – Москва : Машиностроение, 1965. – 493 с.
20. Tarelnyk, V. B. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2019. – Vol. 41. – № 10. – Pp. 1377–1394. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>.

References

1. Bahadur, A. (1996). Aluminum Coatings for Steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 11(2), 225–232. <https://doi.org/10.1080/10426919608947476>.
2. Tarelnyk, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Belous, A.V., Konoplyanchenko, E. V., and Gaponova, O. P. (2018). Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 147–156.
3. Antoszewski, B., Gaponova, O. P., Tarelnyk, V. B., Myslyvchenko, O.M., Kurp, P., Zhylenko, T.I., and Konoplianchenko, I. (2021). Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method. *Materials*, 14, 739.

4. Barile, C., Casavola, C., Pappaletta, G., and Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12, 1536.
5. Tarelyk, V., Haponova, O., Tarelyk, N., and Myslyvchenko O. (2023). Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying. *Uspekhi Fiziki Metallov*, 24(2), 282-318.
6. Borisova A.L., Kaporik N.I., Tsymbalistaya T.V., and Vasilkovskaya M.A. (2019). Diffuzionnyye zharostoykiye pokrytiya dlya nerzhavayushchey i uglerodisty staley [Diffusion heat-resistant coatings for stainless and carbon steels]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (10), 28-35.
7. Brochu, M., Portillo, J.G., Milligan, J. and Heard D.W. (2011). Heard development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process. *The Open Surface Science Journal*, 3, 105-114.
8. Bailey J.C., Porter, F.C., Pearson, A.W., & Jarman, R.A. (1994). Aluminum and Aluminum Alloys, in *Corrosion: Metal / Environment Reactions*, third edition, Edited by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, Butterworth Heinemann.
9. Wood, R.J.K., and Speyer, A.J. (2004). Erosion–corrosion of candidate HVOF aluminium-based marine coatings. *Wear*, 256(5), 545-556.
10. Zhang Bo, Li Ying, and Wang Fuhui (2007). Electrochemical corrosion behaviour of microcrystalline aluminium in acidic solutions. *Corrosion Science*, 49(5), 2071-2082.
11. Charrier C., Jacquot, P., Denisse, E., Millet, J.P., and Mazille H. (1997). Aluminium and Ti/Al multilayer PVD coatings for enhanced corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 90(1–2), 29-34.
12. Mehmood, M., Akiyama, E., Habazaki, H., Kawashima, A., Asami, K., and Hashimoto, K. (1998). The effect of heat treatment on the corrosion behavior of sputter-deposited aluminum–chromium alloys. *Corrosion Science*, 41(3), 477-499.
13. Fatma Ahnia and Boualem Demri (2013). Evaluation of aluminum coatings in simulated marine environment. *Surface and Coatings Technology*, 220, 232-236.
14. Min-Su Han, Yong-Bin Woo, Seok-Cheol Ko, Young-Jae Jeong, Seok-Ki Jang, and Seong-Jong Kim (2009). Effects of thickness of Al thermal spray coating for STS 304. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(4), 925-929.
15. Deevi, S.C., and Sikka, V.K. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357-375.
16. Matysik, P., Józwiak, S., and Czujko, T. (2015). Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Microstructures and Mechanical Properties. *Materials*, 8(3), 914-931.
17. Wang, J., Zhang M., Dai, S., and Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13, 1473-1497.
18. Kirik, G.V., Gaponova, O. P., Tarelyk, V. B., Myslyvchenko, O. M., & Antoszewski, B. (2018). Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 56, 688–696.
19. Minkevich, A. N. (1965). *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]*. Mashinostroyeniye.
20. Tarelyk V. B., Gaponova, O. P., and Myslyvchenko O. M. (2019). 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.*, 41(10), 1377–1394.

Отримано 13.06.2024

Oksana Haponova¹, Natalia Tarelnik²

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

²Candidate of Economic Sciences, 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

EVALUATION OF THE HEAT RESISTANCE OF ALUMINUM COATINGS ON STEELS PRODUCED BY ELECTROSPARK ALLOYING

Increasing operating temperatures of power plant and gas turbine components, combined with the deteriorating quality of the fuels used, have led to the widespread use of surface modification technologies to ensure extended service life. Cr, Al and Si based coatings, all individually and in combination, are used to increase the resistance of materials to high temperature corrosion, including high temperature oxidation and hot corrosion, erosion, erosion-corrosion interaction, wear and thermal degradation. Coatings with a high aluminium content are the most widely used. The most popular and simplest method of surface modification in terms of industrial implementation is electrospark alloying (ESA). In most cases, the ESA method is used to form hard wear-resistant and soft running-in coatings or to restore worn surfaces. The use of electrospark protective corrosion and/or heat-resistant coatings is an open issue and requires further research.

The aim of this paper is to evaluate the heat resistance of aluminium-containing electrospark coatings deposited on steels. Steel 20, 12X18H10T and 06X12H3ДЛ were used as substrates. Aluminium coatings were formed on Steel 20 using the ESA method, and single-layer coatings of Al, Ni, Cr and Nichrome (80%Ni+20%Cr) and two-layer ESA Al + ESA Ni, ESA Al + ESA Nichrome coatings were formed on 12X18H10T and 06X12H3ДЛ steels using modes that deny 100% continuity and roughness $R_a = 0.7 - 0.9 \mu\text{m}$. The study of the heat resistance of electrospark aluminised coatings on steel 20 showed that they were not inferior to diffusion coatings in high temperature tests. It was found that the mass loss during a test at 980°C for 50 hours was about 0.007 mg/cm², which is close to that of coatings obtained in aluminium melts. Metallographic analysis of the oxidation pattern of samples of steel 20 after the heat resistance test showed that the substrate is oxidised after exposure to high temperatures, as evidenced by the presence of oxides in the surface layer. Samples without a protective coating are particularly susceptible to oxidation. Coatings applied in the aluminium melt and by the ESA method protect the substrate from oxidation, as evidenced by the lower oxide content in the surface layer of the substrate. The study of the heat resistance of samples of 12X18H10T and 06X12H3ДЛ steels after ESA showed that the absolute values of the mass changes in samples of steels with aluminium coatings – ESA Al, i.e. alitisation by ESA, and ESA Al + ESA Nichrome (80%Ni+20%Cr), i.e. with a two-layer ESA coating, after a heat resistance test at 950 °C for 100 hours, are more than 90% lower than those of uncoated samples, which indicates an effective protection of the steel surface against high temperature oxidation. Therefore, the developed coatings can be recommended as heat resistant.

Keywords: electrospark alloying; heat resistance; coating; alitisation.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 20.