

УДК 621.793

Є. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, Л. Ф. Яценко, В. Ф. Мазанко

ВПЛИВ ХРОМОВОГО АНОДУ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СПЛАВІВ Fe-Cr ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ

Исследовано влияние хромового анода на процесс легирования и свойства сплавов железо-хром при электроискровом легировании. Показано упрочнение поверхностных слоев в зависимости от состава обрабатываемого материала.

Ключевые слова: электроискровое легирование хромом, упрочнение поверхности, сплавы железо-хром

Вступ

Однією з найбільш важливих задач технічного прогресу є підвищення довговічності та надійності робочих поверхонь деталей машин та інструменту, які працюють в складних умовах експлуатації. Рішенням цієї проблеми може стати розробка нових методів і технологій нанесення локальних покриттів з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Одним з таких методів є електроіскрове легування (ЕІЛ) — один з ефективних електрофізичних методів обробки металів, який оснований на використанні концентрованих потоків енергії. ЕІЛ надає можливості легування будь-якими струмопровідними матеріалами, низькій енергоємності процесу, простоті виконання технологічних операцій, локальності нанесення покриття без помітної деформації виробу, відсутності нагрівання всього об'єму металу та ін. [1]. Це приводить до високої міцності зчеплення нанесеного шару з матеріалом основи.

Суть методу ЕІЛ полягає в наступному: тонкі поверхневі шари металу локально оплаваються під дією іскрових розрядів в міжелектродному проміжку з участю продуктів електроерозії легуючого електроду (в рідко-паровій і твердих фазах); розплав насичується легуючими компонентами; легований шар формується на поверхні катоду з наступним швидким охолодженням (10^3 – 10^4 град/с) [2].

Ефективність процесу ЕІЛ тим вища, чим більша кількість матеріалу аноду буде перенесена та закріплена на поверхні катоду за одиницю часу. Встановлено, що кількісні і якісні характеристики утвореного поверхневого шару в процесі ЕІЛ залежать від енергії імпульсних розрядів; електричних параметрів, тривалості обробки; природи матеріалу електродів; складу і стану середовища, в якому проводять обробку; відносного розташування і руху електродів [3].

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що більшість робіт [1–3] присвячена вивченню технологічних параметрів процесу ЕІЛ, а процеси легування бінарних сплавів елементом, що входить також до складу катоду вивчені мало. Метою даної роботи є дослідження структури, мікротвердості, фазового складу та кінетики формування поверхневого шару в сплавах заліза з хромом при електроіскровому легуванні перехідним металом — Cr.

© Іващенко Євген Вадимович, кандидат фізико-математичних наук, доцент Національного технічного університету "КПІ"; Лобачова Галина Геннадіївна, Яценко Людмила Федорівна – наукові співробітники цього ж інституту; Мазанко Володимир Федорович, доктор технічних наук, завідуючий відділом Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

Матеріали і методика дослідження

Для проведення експериментів в якості легуючого електроду (анод) було обрано перехідний метал високої чистоти — хром. Катодами виступали: подвійні модельні сплави заліза Fe + 2,5% (мас.) Cr, Fe + 1,5% (мас.) Cr, а також Fe-армко. ЕІЛ здійснювали на установці “Элитрон-26А” при силі струму розряду 1,2–2,2 А, напрузі в міжелектродному проміжку 60В, частоті механічних коливань аноду 50 Гц, час обробки 3–7 хв., в міжелектродному середовищі — повітрі.

Для виявлення закономірностей формування поверхневого шару при ЕІЛ заліза і сплавів заліза хромовим електродом проведено дослідження кінетики масоперенесення матеріалу катоду і аноду. Приріст маси катоду і ерозію аноду в залежності від часу обробки вивчали гравіметричним методом з використанням лабораторних електронних вагів AXIS AD50 з точністю до 0,0001 г. Дослідження структури легованих шарів проводили на оптичному мікроскопі МИМ-10 і растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. Для визначення мікротвердості використовували мікротвердомір ПМТ-3М при навантаженні на алмазну пірамідку 50 г. Фазовий рентгеноструктурний аналіз здійснювали на рентгенівській установці УРС-55 у FeK_{α} -випромінюванні ($\lambda_{K_{\alpha}Fe} = 1,93728 \text{ \AA}$) при використанні камери Дебая-Шерера (РКД).

Експериментальні результати і обговорення

Електроіскрове легування досліджуваних сплавів хромовим анодом приводить до виникнення на поверхні зразків легованого шару, мікроструктура якого являє собою нерівномірний по товщині світло-травлений шар (рис. 1). Під легованим шаром знаходиться зона термічного впливу та основний метал. Металографічними дослідженнями також було виявлено в легованому шарі наявність тріщин та пор, що може бути пояснено тривалим часом обробки, низькою теплопровідністю сплавів і високими напруженнями, які виникають під час легування.

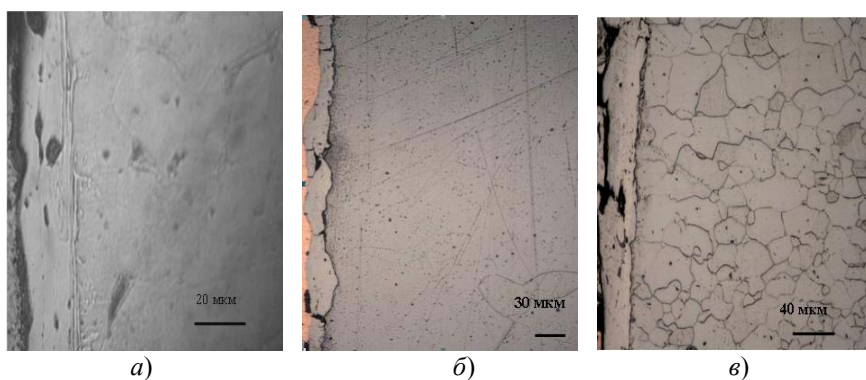


Рис. 1. Мікроструктура легованого шару сплавів заліза після ЕІЛ ($U = 60 \text{ В}$, $I = 1\text{--}1,2 \text{ А}$, $t = 3\text{--}7 \text{ хв}$): а) Fe-армко; б) сплав Fe + 1,5% (мас.) Cr; в) сплав Fe + 2,5% (мас.) Cr

Леговані шари на всіх сплавах мають підвищену мікротвердість, у порівнянні з мікротвердістю вихідних зразків. Найбільшу мікротвердість ле-

гованого шару має сплав Fe + 2,5% (мас.) Cr, порівняно з сплавом Fe + 1,5% (мас.) Cr і Fe-армко (рис. 2).

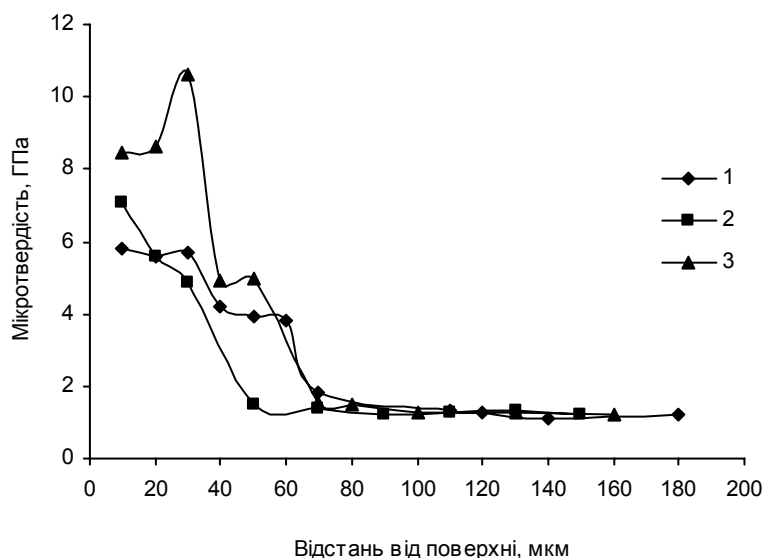


Рис. 2. Мікротвердість поверхневої зони, ЕІЛ Cr-анодом сплавів: 1 — Fe-армко; 2 — сплав Fe + 1,5% (мас.) Cr; 3 — сплав Fe + 2,5% (мас.) Cr

Рентгенофазовим аналізом виявлено наявність в легovanому шарі інтерметаліду FeCr. Завдяки виникненню цієї фази відбувається збільшення мікротвердості легovanого шару. Підвищення мікротвердості в поверхневих зонах може бути пов'язано з наявністю в електроіскрових покриттях також нітридів, що можуть утворюватися при взаємодії розплавленого металу з азотом повітря. Характеристики отриманих шарів наведено в таблиці

Таблиця 1

Характеристики легovanого шару при ЕІЛ на повітрі сплавів заліза

Матеріал катоду, % (мас.)	Матеріал аноду	Товщина шару, мкм	K_{zm}
Fe-армко	Cr	20–34	4,8
Fe + 1,5 Cr	Cr	25–34	5,4
Fe + 2,5 Cr	Cr	37–53	8,1

Найбільша товщина легovanого шару 53 мкм, спостерігається при легуванні сплаву Fe + 2,5% (мас.) Cr. Наведені коефіцієнти зміцнення (K_{zm}) розраховуються як співвідношення найбільшого значення мікротвердості легovanого шару до мікротвердості основи сплавів.

З використанням гравіметричного методу були отримані експериментальні дані залежностей зміни маси катоду $\Delta m_k^3(t) = m_k(t_{n+1}) - m_k(t_0)$ і аноду $\Delta m_a^3(t) = m_a(t_{n+1}) - m_a(t_0)$, а також приросту маси катоду $\Delta m_k^n(t) = m_k(t_n) - m_k(t_{n-1})$ і ерозії аноду $\Delta m_a^n(t) = m_a(t_n) - m_a(t_{n-1})$,

визначали через кожну хвилину легування 1 см² поверхні (рис. 3–4). Коефіцієнт перенесення матеріалу визначали як відношення приросту маси катоду до величини ерозії аноду за формулою: $K = \Delta m_{\kappa}^n / \Delta m_a^n, \%$.

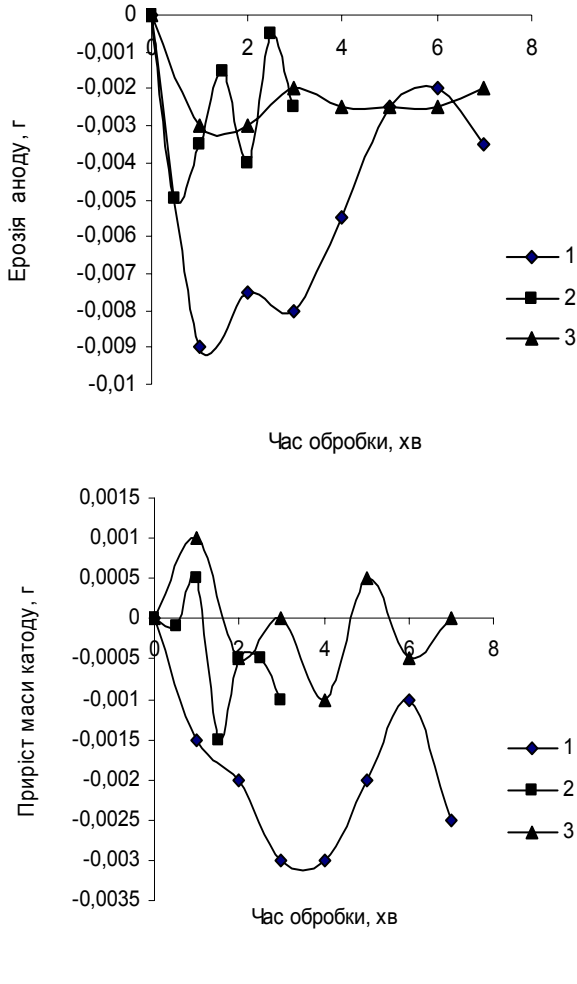


Рис. 3. Залежність ерозії Cr-аноду (а) і приросту маси катоду (б) від часу обробки при ЕЛЛ: 1 — сплав Fe + 1,5% (мас.) Cr, 2 — Fe-армко, 3 — сплав Fe + 2,5% (мас.) Cr.

Дослідження кінетики масоперенесення при електроіскровому легуванні сплавів заліза хромовим електродом показало, що найбільше перенесення матеріалу аноду на катод спостерігається при легуванні сплаву Fe + 2,5% (мас.) Cr ($K = 48\%$).

З літературних джерел відомо [4], що в більшості випадків в початковий момент часу ЕЛЛ маса катоду зростає, а маса аноду зменшується. При цьому по абсолютному значенню зменшення маси аноду не співпадає з приростом маси катоду, що може свідчити про те, що частина речовини видаляється з поверхні обох електродів у міжелектродний проміжок у вигляді продуктів ерозії. Після досягнення певного часу обробки процес збільшення маси катоду уповільнюється, а потім спостерігається зменшення його маси.

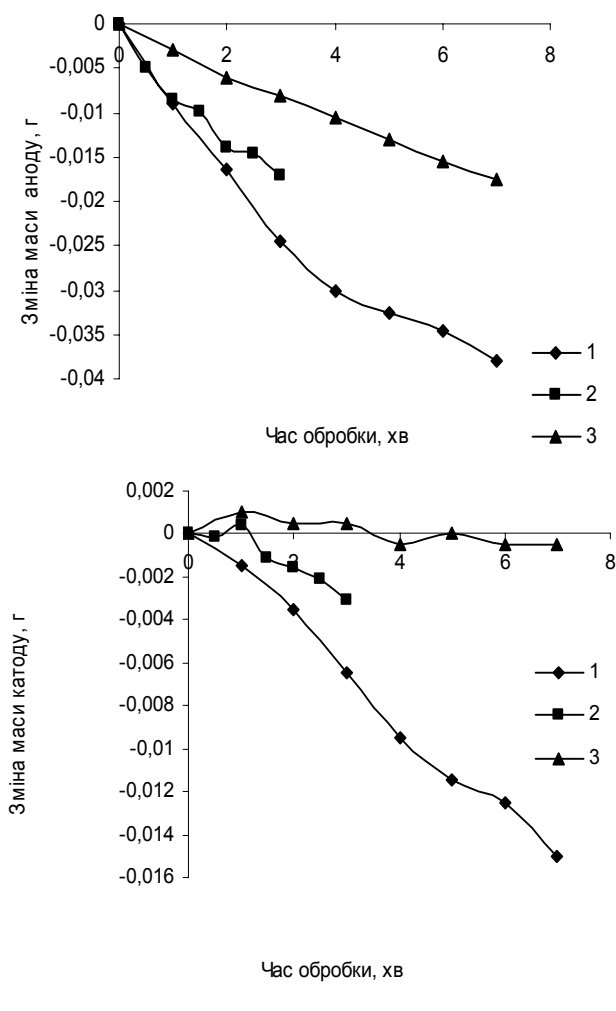


Рис. 4. Залежність зміни маси Cr — аноду (а) і катоду (б) від часу обробки при ЕІЛ: 1 — сплав Fe + 1,5% (мас.) Cr, 2 — Fe-армко, 3 — сплав Fe + 2,5% (мас.) Cr.

На графіках (рис. 3, б; 4, б) показано збільшення маси катоду (до 2 хв. легування), а потім відбувається зменшення маси і при цьому маса катоду стає меншою початкового значення. Це може бути викликано зростанням концентрації напружень в легovanому шарі під дією імпульсних і механічних навантажень в процесі обробки та зворотнім масоперенесенням (матеріал катоду переноситься на анод). Підйоми на кривих ерозії аноду (рис. 1, а) можуть свідчити про зворотнє масоперенесення матеріалу катоду на анод з утворенням вторинних структур. В такому випадку наступне легування буде відбуватися вже не чистим елементом – хромом, а сплавом хрому з зміненою структурою. Зменшення маси аноду (рис. 2, а) має залежність близьку до лінійної. Найбільші зміни маси хромового аноду зафіксовано при легуванні Fe-армко.

Було проведено дослідження структури поверхневого шару сплаву Fe + 2,5% (мас.) Cr після ЕІЛ (рис. 5, а) на растровому електронному мікроскопі і визначено розподіл елементів в поверхневому шарі (рис. 5, б).

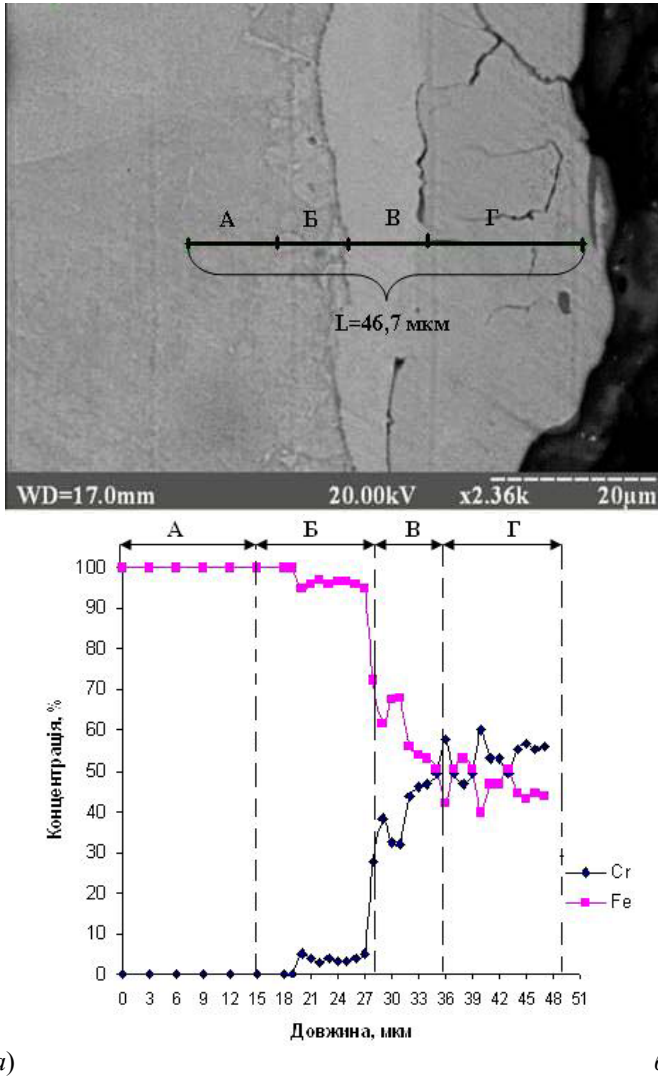


Рис. 5. Структура поверхньої зони (а) і розподіл елементів в поверхневому шарі вздовж лінії L (б) після ЕІЛ, Сг-анод, сплав Fe + 2,5% (мас.) Сг

Виявлено, що поверхневий шар складається з двох зон (В і Г), які розрізняються інтенсивністю травлення. Під легованим шаром спостерігається зона термічного впливу (зона Б). Зона А — це матеріал катоду — зразка у вихідному стані. Утворена зона Г, являє собою ділянку взаємного перемішування і кристалізації матеріалу аноду і катоду.

Ймовірно, що формування поверхневих шарів зміцненого матеріалу при електроіскровому легуванні відбувається за рахунок взаємодії матеріалу Сг-аноду і катоду Fe з утворенням твердих розчинів з необмеженою розчинністю та формуванням мілкодисперсних частинок інтерметалідів FeCr, які сприяють підвищенню мікротвердості легованого шару. Наявність хрому в сплаві приводить до інтенсифікації процесу виникнення частинок інтерметаліду, що веде до утворення більш високої мікротвердості поверхнього шару у порівнянні з легованим шаром на залізі. Взаємодія розплавленого матеріалу з повітрям призводить до насичення його азотом, і формування частинок нітридів хрому, що також буде сприяти підвищенню мікротвердості.

Висновки

З використанням гравіметричного, мікроструктурного, мікродюрOMETричного, растрового електронномікроскопічного та мікрорентгеноспектрального аналізів встановлено, що мікротвердість поверхневих шарів сплавів заліза і Fe-армко після ЕІЛ Cr-анодом підвищується. Найбільша мікротвердість поверхневої зони 10,6 ГПа досягається при легуванні сплаву Fe + 2,5% (мас.) Cr. Це може бути зумовлене виникненням структури з нерівноважно — напруженою станом внаслідок утворення інтерметалідів FeC та, ймовірно, мілкодисперсних нітридів хрому в результаті взаємодії з азотом повітря. Збільшення вмісту хрому в сплавах призводить до підвищення мікротвердості та товщини легovanого шару.

При дослідженні кінетики перенесення при ЕІЛ хромом спостерігається збільшення маси катоду (до 2 хв. легування). Зі збільшенням часу легування відбувається зменшення маси катоду нижче початкового значення, що може свідчити про зворотнє перенесення матеріалу.

Запропонована обробка може бути використана при зміцненні деталей машинобудівної галузі.

Досліджено вплив хромового аноду на процес легування та властивості сплавів залізо-хром за електроіскрового легування. Показано зміцнення поверхневих шарів в залежності від складу матеріалу, що обробляється.

Ключові слова: електроіскрове легування хромом, зміцнення поверхні, сплави залізо-хром

Influence of Cr-anode on alloying and properties of Fe–Cr alloys were investigated. Strengthening of surface layers from content of Fe–Cr alloys was shown.

Keywords: electro-sparkling alloying by chromium, strengthening of surface, Fe–Cr alloys.

1. *Николенко С. В.* Исследование модифицированного поверхностного слоя стали 35 после электроискрового легирования / С. В. Николенко, Н. М. Потапова, Л. П. Метлицкая, В. А. Баранов // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 2. – С. 53–59.
2. *Подчерняева И. А.* Электроэрозионная стойкость и структурнофазовые превращения при электроискровом и лазерном легировании титанового сплава композиционной керамикой на основе систем ZrB₂–ZrSi₂ и TiN–Cr₃C₂ / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. М. Панашенко // Порошковая металлургия. – 2008. – № 1/2. – С. 151–161.
3. *Лазаренко Б. Р.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12–16.
4. *Пячин С. А.* О зависимости изменения массы электродов от времени при электроискровом легировании / С. А. Пячин, Н. Е. Аблесимов, Д. Л. Ягодзинский // Электрические методы обработки поверхности. – 2003. – № 1. – С. 19–26.
5. *Николенко С. В.* Поверхностная обработка титанового сплава BT-20 электроискровым легированием / С. В. Николенко, А. Д. Верхотуров, С. В. Коваленко // Перспективные материалы. – 2002. – № 3. – С. 13–19.