

Особливості формування покриттів при електроіскровому легуванні заліза та міді

К. М. Храновська, кандидат технічних наук

В. Ф. Мазанко, доктор технічних наук

В. П. Бевз, кандидат фізико-математичних наук

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Наведено результати досліджень, які свідчать, що найбільш ефективно процес формування покриття відбувається при електроіскровому легуванні міді у середовищі рідкого азоту. Показано, що найбільше зміцнення легованого шару досягається при електроіскровій обробці заліза у рідкому азоті.

Водночас із розвитком та вдосконаленням техніки постійно зростають вимоги до її експлуатації: підвищення швидкостей, температури, тощо. Використання традиційних конструкційних матеріалів в деяких випадках вже не в змозі задовольнити комплекс цих вимог. У зв'язку із цим економічно та технологічно доцільним є нанесення захисних покриттів [1].

Електроіскровий метод їх нанесення є одним з ефективних методів надання робочим поверхням деталей машин необхідних механічних та фізико-хімічних властивостей [2].

Однак, наявні в літературі дані стосуються, в основному, технологічних аспектів процесу електроіскрового легування (ЕІЛ), а вплив середовища обробки на особливості взаємодії матеріалів при цьому вивчено недостатньо. У наших попередніх роботах [3, 4] було встановлено, що проведення процесу ЕІЛ за температур, нижчих кімнатної, суттєво впливає на фазовий склад, а також параметри масоперенесення і мікротвердість мідної та титанової підкладок, значно збільшуючи їх порівняно із легуванням на повітрі.

В даній роботі досліджувався вплив середовища легування на мікротвердість та процеси масоперенесення і фазоутворення у поверхневих шарах міді та заліза при електроіскровій обробці нікелем.

Об'єктом дослідження обрано мідь марки МО (99,97 % Cu) та технічне залізо (99,9 % Fe). Зразки (католи) виготовляли у формі циліндрів діаметром та висотою 10 мм, після чого проводили їх стабілізаційний відпал у вакуумі при 1273 К (залізо) та 1073 К (мідь) впродовж чотирьох годин. Після відпалу на одну з торцевих сторін зразків наносили електролітичним методом шар радіоактивного ізотопу нікелю ^{63}Ni товщиною 0,3 мкм із вихідною активністю $5 \cdot 10^3$ імп/хв. Електроіскрове легування зразків проводили на установці "ЕЛІТРОН-22" ($I = 5$ А, $U_{x,x} = 50$ В, $c = 360$ мкФ, $E = 1,0$ Дж, $f = 50$ Гц, $\tau = 200$ мкс). Питомий час легування становив 1 хв/см². В якості анодів використовували чистий нікель. Нанесення покриттів проводили на повітрі та в середовищі рідкого азоту, для чого було виготовлено та застосовано спеціальний контейнер [5].

Рентгеноструктурний аналіз поверхні оброблених зразків проводили в камері РКД у залізному K_{α} випромінюванні. Рентгенограми розшифровували за допомогою

Нові технологічні процеси і матеріали

картотеки ASTM. Мікротвердість травлених шліфів визначали на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням 50 г. Розподіл ізоотопу ^{63}Ni у зразках після ЕІЛ визначали методом зняття шарів. Оцінку величин коефіцієнтів масоперенесення (D_m) проводили за методикою [6].

У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів масоперенесення (D_m) та глибини проникнення радіоактивного ізоотопу ^{63}Ni (X) у мідну та залізну підкладки при електроіскровому легуванні нікелевим анодом. Таким чином, після ЕІЛ заліза нікелевим анодом на повітрі радіоактивний ізоотоп проникнув у приповерхневий шар зразка на глибину до 20 мкм. Водночас, при обробці в середовищі рідкого азоту цей показник зменшується приблизно в два рази і складає приблизно 12 мкм. Щодо мідного зразка, зниження температури середовища обробки призводить не до зменшення глибини проникнення ізоотопу (що спостерігалось для заліза), а до різкого збільшення цього параметра. Зокрема, глибина проникнення ^{63}Ni збільшується майже у 3,5 рази.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів масоперенесення та глибина проникнення ізоотопу ^{63}Ni у мідь та залізо при ЕІЛ нікелем

Середовище обробки	Анод	Катод	Параметри масоперенесення	
			Глибина проникнення ізоотопу X , мкм	Коефіцієнт масоперенесення $D_m \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$
повітря	Ni	Fe	20	3,35
		Cu	20	2,32
рідкий азот		Fe	12	1,94
		Cu	70	103,2

Порівняння значень коефіцієнтів масоперенесення свідчить про те, що рухливість атомів нікелю в міді при обробці в рідкому азоті майже у 53 рази вище в порівнянні із його рухливістю у залізі в тих самих умовах обробки. У той же час, при легуванні на повітрі рухливість ^{63}Ni у залізі вище майже у 1,4 рази, порівняно з рухливістю ізоотопу нікелю у міді при обробці у тому ж середовищі (табл. 1).

Однак, слід підкреслити, що значення коефіцієнтів масоперенесення мають якісний характер через те, що на сьогодні ще відсутні методи визначення даного параметра, які б враховували всю специфіку процесу електроіскрового легування. В рамках даної роботи перш за все нас цікавило відношення зазначених коефіцієнтів.

Проведені нами розрахунки свідчать, що глибина проникнення атомів ^{63}Ni в мідь майже у п'ять разів більша, аніж у залізо при ЕІЛ у рідкому азоті, що можна пояснити відмінністю значень температуропровідності цих металів ($1,14 \text{ см}^2/\text{с}$ для міді та $0,22 \text{ см}^2/\text{с}$ – заліза, а їх відношення складає приблизно 5,18). Таким чином, кореляція між відношенням глибини проникнення атомів ізоотопу та величинами температуропровідності вказаних металів, дозволяє зробити висновок, що знайдений експериментально (при ЕІЛ у рідкому азоті) ефект може бути обумовлений саме різною температуропровідністю міді та заліза.

За результатами проведеного фазового рентгеноструктурного аналізу поверхні міді підвищення температури підкладки призводить до збільшення рефлексів від оксидів міді, карбиду нікелю Ni_3C , що обумовлено збільшенням кисню та вуглецю у поверхневому шарі зразка, при іонізації молекул N_2 та CO_2 в плазмі іскрового розряду. При ЕІЛ як і рідкому азоті, так і на повітрі, з'являються лінії від інтерметаліду $\text{Cu}_{3,8}\text{Ni}$. Окрім вище названих фаз, при обробці на повітрі реєструються рефлекси від

потрійної сполуки Ni_2CuO_3 (табл. 2). Відсутність азоту у електроіскрових покриттях на міді пояснюється тим, що розчинності азоту у твердій та рідкій міді практично не має. При електроіскровому легуванні заліза нікелем, згідно даних рентгенофазового аналізу, з'являються рефлекси від інтерметаліду FeNi. При легуванні у рідкому азоті наявні рефлекси від γ -Fe, а на повітрі – потрійного з'єднання FeNiN (табл. 2).

Таблиця 2
Фазовий склад та характеристики покриттів на міді та залізі після електроіскрової обробки нікелем

Анод	Катод	Середовище обробки	Фазовий склад покриття	Середня мікротвердість легованого шару $H_{\mu}^{ли}$, ГПа	Коефіцієнт зміцнення легованого шару, $K_{зміц}$
Ni	Fe	повітря	FeNi, FeNiN	6,8	4,53
		рідкий азот	FeNi, γ -Fe	8,5	5,6
	Cu	повітря	$Cu_{3,8}Ni$, CuO, Ni_3C , Ni_2CuO_3	3,56	4,45
		рідкий азот	$Cu_{3,8}Ni$, Cu_2O , Ni_3C , Cu	3,47	4,34

За даними мікродюрOMETричного аналізу найбільше значення середньої мікротвердості легованого шару отримуємо при електроіскровій обробці заліза в рідкому азоті, що може бути обумовлено утворенням аустеніту (табл. 2).

Нами був проведений розрахунок коефіцієнтів зміцнення легованої поверхні зразків за формулою [7]:

$$K_{зміц} = \frac{H_{\mu}^{ли}}{H_{\mu}^{осн}}$$

де $H_{\mu}^{ли}$, $H_{\mu}^{осн}$ - середнє значення мікротвердості легованого шару та основи, відповідно.

Розраховані значення коефіцієнтів зміцнення свідчать, що найбільше зміцнення легованого шару отримуємо при ЕІЛ заліза нікелем у рідкому азоті (табл. 2).

Отримані нами результати можуть бути пояснені наступним чином. Як відомо [2, 8], при електроіскровому легуванні відбуваються складні високотемпературні імпульсні процеси, що супроводжуються виникненням ударних хвиль та значними температурними градієнтами. В результаті цього може утворитись велика густина дислокацій та розвинута дислокаційна структура, що, на нашу думку, і буде сприяти спрямованому рухові атомів нікелю у збурених кристалічних ґратках міді та заліза, призводячи до істотного збільшення дифузійної зони в них. Ймовірно, атому нікелю більш енергетично вигідно знаходитись в об'ємі підкладки, аніж на її поверхні, оскільки в об'ємі діють сили розтягу, а на її поверхні – стиснення [9].

Розраховані значення коефіцієнтів зміцнення свідчать, що найбільше зміцнення легованого шару отримуємо при ЕІЛ заліза нікелем у рідкому азоті (табл. 2).

Проведення процесу електроіскрової обробки в середовищі рідкого азоту чинить ще більший вплив на параметри кристалічної ґратки міді та заліза, на їх енергетичні та механічні характеристики, аніж легування на повітрі, збільшує градієнти температур і, відповідно, термопружні напруження, що, як відомо, спричиняє подрібнення зерна металу та, в свою чергу, призводить до зростання глибини проникнення атомів нікелю

в нього. До того ж, легування у рідкому азоті спричиняє зменшення амплітуди коливань атомів підкладки, що може бути причиною зменшення глибини проникнення атомів ізотопу нікелю в залізо. Для міді ж, навпаки відбувається збільшення глибини проникнення атомів ізотопу. Це може бути обумовлено меншими температурними градієнтами в міді, ніж у залізі, через її високу теплопровідність, тобто температурні поля проникають з більшою швидкістю на більшу глибину саме в мідь.

Таким чином, встановлено, що найбільш ефективно формування покриття шляхом масоперенесення відбувається на міді при електроіскровому легуванні у середовищі рідкого азоту, що обумовлено високою швидкістю руху хвилі термопружних напружень в ній.

Література

1. Палеха К.К., Эпик А.П. Физико-химические основы нанесения покрытий. – Киев: КПИ, 1992. – 224 с.
2. Кондратьев А. И., Кочетова И. В., Химухин С. Н. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 8. – С. 15 – 19.
3. Мазанко В.Ф., Храновська К.М., Иващенко Є.В. // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 3. – С. 46 – 49.
4. Мазанко В.Ф., Храновская Е.Н., Иващенко Е.В. // Доповіді НАН України. – 2007. – № 8. – С. 96 – 99.
5. Патент на корисну модель № 23145 Україна, МПК⁶ В23Н 9/00. Спосіб поверхневої обробки деталей / В. Ф. Мазанко, К. М. Храновська, О. Є. Погорелов, Є. В. Иващенко // Бюл. “Промислова власність”. – 2007. – № 6. – С. 15.
6. Грузин П. Л. // ДАН СССР. – 1952. – № 2. – С. 289 – 292.
7. Верхотуров А.Д., Гордиенко Л.А., Коневцов П.А. // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 3. – С. 52 – 62.
8. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 267 с.
9. Болеста І.М. Фізика твердого тіла. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І.Франка, 2003. – 480 с.

Одержано 14.04.10

Е. Н. Храновская, В. Ф. Мазанко, В. П. Бевз

Особенности формирования покрытий при электроискровом легировании железа и меди

Резюме

Изложены результаты экспериментальных исследований, которые свидетельствуют, что наиболее эффективно процесс формирования покрытия происходит при электроискровом легировании меди в среде жидкого азота. Показано, что наибольшее упрочнение легированного слоя достигается при электроискровой обработке железа в жидком азоте.

E. N. Khranovskaia, V. F. Mazanko, V. P. Bevz

Features of formation of coats at electric spark alloying of iron and copper

Summary

The experimental results show that most effective process of formation of coating occurs at electric spark alloying of an copper in liquid nitrogen. It is shown, that the highest strengthening of alloying layer is reached at electric spark treatment of an iron in liquid nitrogen.