

УДК 621.039.8
PACS number(s): 32.10.Bi

ОСОБЛИВОСТІ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ У ЗАЛІЗІ ТА МІДІ ВНАСЛІДОК ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПІДКЛАДКИ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ

В. Мазанко, К. Храновська, Є. Іващенко¹, С. Ворона

*Інститут металофізики ім. Г.В.Курдюмова НАН України,
відділ нестационарного масоперенесення
вул.Вернадського, 36, 03680 Київ, Україна
¹Національний технічний університет України
(Київський політехнічний інститут), кафедра фізики металів
просп.Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна
e-mail:katya@online.com.ua*

Методом радіоактивних ізотопів досліджено особливості масоперенесення радіоактивного ^{63}Ni у міді й залізі в умовах електроіскрової обробки за кімнатної температури (293 К) і за температури рідкого азоту (77 К).

З'ясовано, що глибина проникнення ^{63}Ni у метали і форма концентраційної кривої суттєво залежать від природи металу, що обробляється і початкової температури зразка. Зниження температури заліза до 77 К призводить до зменшення довжини дифузійної зони приблизно у тричі, а в міді – до її збільшення у стільки ж разів. Крім того, на концентраційній кривій розподілу ^{63}Ni у міді після обробки при 77 К на глибині ~ 7 мкм формується чітко виражений максимум концентрації нікелю.

Отримані результати аналізують з погляду міграції точкових дефектів, що виникають під час електроіскрового легування і дії на них електричного струму й термопружних напруг.

Ключові слова: залізо, мідь, електроіскрова обробка.

Електроіскрову обробку матеріалів широко застосовують у промисловій практиці. Одним з найважливіших застосувань цієї обробки є електроіскрове легування (ЕІЛ) виробів з металів і сплавів з метою отримання різних покриттів. При цьому високу міцність зв'язку покриття з підкладкою визначають дифузійного проникнення легуючого матеріалу в основу [1, 2]. Детальне дослідження цього питання [3, 4] підтвердило той факт, що під час ЕІЛ відбувається взаємна дифузія з нанесеного шару та підкладки, причому глибина проникнення елементів аноду в катод може досягати десятків і більше мікрометрів. Визначено також, що розміри дифузійної зони значною мірою залежать від параметрів ЕІЛ [3, 5]. До них належать енергія і тривалість розряду,

робоча частота, величина міжелектродного проміжку та інше, причому вплив цих параметрів досить добре вивчено.

Водночас у наукових джерелах майже відсутні дані про вплив температури підкладки на дифузійні процеси при ЕІЛ. На перший погляд, цей параметр не повинен бути суттєвим, тому що в процесі обробки відбувається розігрівання поверхні металу до дуже високих температур. Однак охолодження підкладки (наприклад, до криогенних температур), істотно впливає на параметри кристалічної ґратки, її енергетичні й механічні характеристики, збільшує градієнти температур і, відповідно, термопружні напруги у процесі обробки. Усе це може вплинути на дифузійні процеси при ЕІЛ.

З огляду на це, метою статті було вивчення впливу температури підкладки на процеси масоперенесення в поверхневих шарах при ЕІЛ.

Об'єктами експерименту було обрано залізо технічної чистоти і мідь марки МО чистотою 99,97%. Зразки являли собою циліндри діаметром і висотою 10 мм. Після виготовлення зразків проводили їх стабілізаційний відпал у вакуумі. Зразки із заліза відпалювали за температури 1 000°C, з міді при 800°C упродовж чотирьох годин. Після відпалу на одну з торцевих сторін зразків наносили електролітичним методом шар радіоактивного ізотопу нікелю ^{63}Ni завтовшки 0,3 мкм із вихідною активністю $5 \cdot 10^3$ імп/хв. Товщину нанесеного шару на контрольних зразках визначали зняттям шарів і регулювали активністю зразків, що у всіх випадках була постійною і становила, як зазначалося, $5 \cdot 10^3$ імп/хв. Електроіскрову обробку зразків виконували на установці "ЕФІ-Елітрон" з енергією одиничного імпульсу 1 Дж. Частота імпульсних розрядів була фіксованою і становила 50 Гц, а робоча ємність $c = 360$ мкФ, тривалість імпульсу 200 мкс. Час обробки (τ) 1 см² поверхні зразка – 1 хв. Обраний питомий час $\tau = 1$ хв/см² дав змогу обробити рівномірно всю поверхню без пропусків і перегрівання зразка. Для електроіскрової обробки застосовували аноди з чистого нікелю. Зразки обробляли за температур підкладки 293 К (кімнатна) і 77 К (рідкий азот).

Розподіл ^{63}Ni у зразках після електроіскрової обробки визначали методом зняття шарів. Оцінювали величини коефіцієнтів масоперенесення (D_m) за методикою [6].

На рис. 1 показано концентраційні криві розподілу радіоактивного нікелю ^{63}Ni у залізі після електроіскрової обробки за кімнатної (рис. 1, крива 1) і азотної (рис. 1, крива 2) температур. При цьому концентраційні криві є експонентою, що підтверджується лінійним характером залежності $\ln C = f(x^2)$, де $C = \frac{\partial N}{\partial x}$ (рис. 1). Цей факт є надзвичайно важливим, тому що він свідчить про об'ємний характер процесу масоперенесення атомів.

З порівняння представлених на рис. 1 концентраційних кривих робимо висновок, що зі зниженням температури підкладки до 77 К глибина проникнення ^{63}Ni у залізо суттєво зменшується і становить приблизно 10 мкм, тобто в 2 рази менше порівняно з кімнатною температурою.

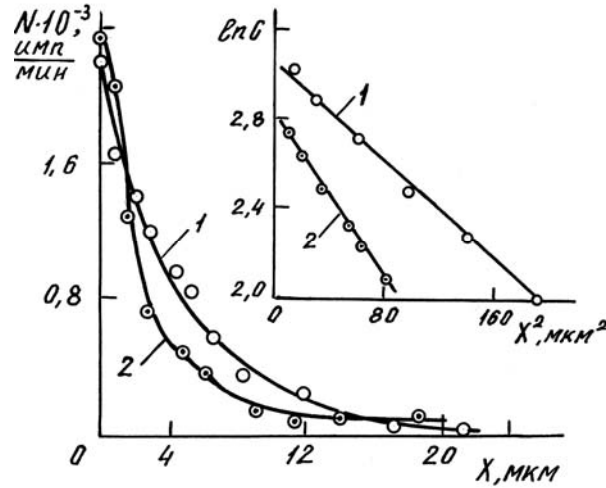


Рис. 1. Концентраційні криві розподілу ^{63}Ni і залежності $\ln C = f(x^2)$, отримані після електроіскрової обробки заліза при 293 К (крива 1) і 77 К (крива 2)

Оцінивши значення коефіцієнтів масоперенесення (D_M) нікелю в залізі у зазначених умовах обробки, одержуємо такі величини: $D_M^{Ni} = 1,67 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ і $D_M^{Azot} = 9,7 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, а їх відношення становить $D_M^{Ni} / D_M^{Azot} = 1,7$. Значення D_M носять якісний характер, оскільки немає надійних, тих, що враховують усі фактори ЕІЛ методи визначення цього параметра. У цьому випадку становить інтерес їх відношення.

Дані з вивчення особливостей масоперенесення в міді за електроіскрової обробки показано на рис. 2. Розглянувши представлені на ньому дані доходимо висновку, що в цьому випадку зниження температури підкладки спричинює не до зменшення глибини проникнення атомів нікелю (як це спостерігається в залізі), а до різкого зростання цього параметра. За температури 293 К у міді $x \cong 20 \text{ мкм}$, а при 77 К $x \cong 70 \text{ мкм}$.

Зазначимо, що й у цьому випадку концентраційний розподіл нікелю в міді є експонентою, що також підтверджується лінійною залежністю $\ln C = f(x^2)$ (рис. 2). Превертає увагу поява максимуму концентрації нікелю в міді на початковій ділянці концентраційної кривої (на відстані $\sim 7 \text{ мкм}$ від поверхні зразка) після обробки в рідкому азоті.

Під час обробки заліза ця особливість відсутня. Поява такого максимуму може бути пов'язана з утворенням на поверхні мідного зразка покриття з нікелю завтовшки порядку 7 мкм, що екранує радіоактивний ^{63}Ni . Відсутність такого максимуму на міді при 293 К і на залізі може свідчити про те, що утворення покриття на міді при 77 К відбувається більш ефективно.

Оцінка величин коефіцієнтів масоперенесення свідчить показала, що рухливість атомів нікелю в міді при 77 К більш ніж у 40 разів вища порівняно з 293 К (відповідно, $51,6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ і $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$).

Порівняння даних, отриманих під час обробки міді і заліза свідчать про те, що рухливість атомів нікелю в міді при 77 К приблизно в 50 разів вища порівняно із залізом. Водночас при 293 К рухливість ^{63}Ni у залізі вища приблизно у 1,4 раза.

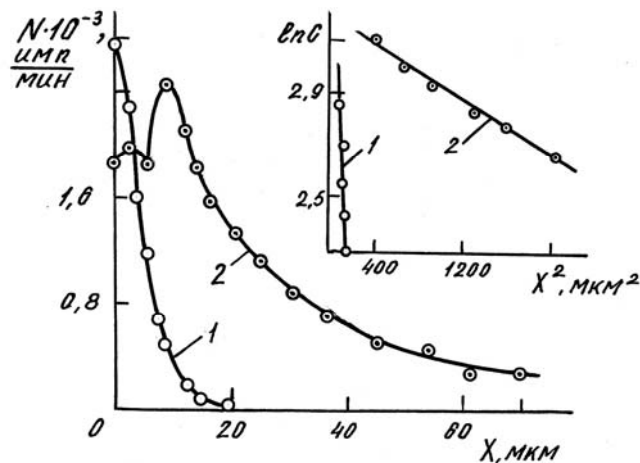


Рис. 2. Концентраційні криві розподілу ^{63}Ni і залежності, $\ln C = f(x^2)$, отримані після електроіскрової обробки міді за 293 К (крива 1) і 77 К (крива 2)

Аналізуючи отримані експериментальні результати, потрібно насамперед зупинитися на двох питаннях. По-перше, вадливо пояснити дуже високу рухливість атомів у металах під час електроіскрової обробки.

Справді, для того, щоб нікель проникнув у мідь чи залізо на десятки мікронів, у стаціонарних умовах необхідні десятки і сотні годин високотемпературних відпалів. У нашому ж випадку процес обробки триває ~ 1 хв.

Розглянемо погляди деяких авторів на це питання. Так, автори праці [7] вважають, що дифузія металу аноду в катод під час електроіскрової обробки ($E \cong 0,1 \text{ Дж}$; $\tau_H \cong 40 - 200 \text{ мкс}$) переважно відбувається в рідкій фазі. Цей висновок ґрунтується на збігу отриманих ними експериментально і розрахунковим шляхом значень коефіцієнтів дифузії при ЕІЛ з величинами D_m у рідких металах. Однак, як свідчать багато досліджень, дифузійна зона при ЕІЛ у багато разів перевершує розміри розплавленої ділянки. Крім того, при реалізації запропонованого механізму напевно не збереглася б лінійна залежність $\ln C = f(x^2)$, що є ознакою об'ємної дифузії у твердій фазі.

У дослідженні [7] як основний розглядається міжвузельний механізм перенесення атомів для розглянутих умов обробки. У [7] було зазначено, що ефективна температура "газу" міжвузельних атомів, що виникає на межі контакту рідка-тверда фаза, визначається щільністю теплового потоку Q .

При іскровому розряді

$$Q \sim \frac{W_k}{\tau_n \cdot S_k} \quad (1)$$

де W_k – частина енергії розряду (W_p), що виділяється на катоді; τ_n – тривалість імпульсу; S_k – площа впливу розряду.

З урахуванням $W_k \sim C \cdot U^2$, $\tau_n \sim C$, $S_k \sim C$ щільність теплового потоку і, відповідно, ефективна температура T_{ef} при інших рівних умовах визначаються напругою і ємністю

$$Q \sim T_{ef} \sim \frac{U^2}{C}. \quad (2)$$

Глибина проникнення атомів в метал, що обробляється (у тому числі й ізотопу) характеризується [7] величиною d , що є обернено пропорційною T_{ef} і дорівнює:

$$d = \frac{m \cdot \lambda^2}{2 \cdot k \cdot T_{ef}}, \quad (3)$$

де m – маса атому, k – постійна Больцмана, λ – коефіцієнт тертя одиничної маси.

На жаль, обидва підходи не враховують низки чинників, що супроводжують процес ЕІЛ. До таких належать високі тиски, термopужні напруги, потужні струми і тощо. Наявність цих чинників, може забезпечити спрямований рух атомів у збурених кристалічних ґратах, спричинюючи істотне збільшення дифузійної зони.

Другим, не менш важливим, є питання про вплив температури підкладки на масоперенесення при ЕІЛ. Питання ще більш ускладнюється, якщо врахувати, що це явище виявилось неоднозначним.

Можна припустити, що відповідь на це питання лежить у відмінностях термодинамічних, електричних і механічних властивостей металів, що обробляються, а сам ефект потребує ретельнішого вивчення.

Отже, отримані у статті результати свідчать про те, що температура підкладки при ЕІЛ може впливати на масоперенесення в металах, що піддають обробці. Отже, змінюючи температуру підкладки, можна впливати на багато характеристик покриттів, змінюючи їх у необхідну сторону. Крім того, дослідження цього явища може суттєво розширити наші уявлення про фізичні механізми процесів, що відбуваються у металах під час електроіскрової обробки.

-
1. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде // В сб. “Электроискровая обработка металлов”. 1957. № 1. С. 70–74.
 2. Гитлевич А.Е., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. и др. Массоперенос в поверхностных слоях стали и титана при многократном воздействии импульсных разрядов // Электронная обработка материалов. 1990. № 1. С. 20–24.
 3. Ревуцкий В.М., Мазанко В.Ф., Заворыкин Л.О. и др. Влияние параметров разряда на распределение элементов электродов в

- электроискровых покрытиях // Электронная обработка материалов. 1983. № 1. С. 22–24.
4. *Мионов В.М.* Исследование фазового состава зоны взаимодействия молибдена с железом и сталями при электроискровой обработке // Перспективные материалы. 2003. № 5. С. 84–88.
 5. *Бакуто И.А., Мицкевич М.К.* О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 17–19.
 6. *Грузин П.Л.* Применение искусственно радиоактивных индикаторов для изучения процессов диффузии и самодиффузии // Доклады АН СССР. 1952. Т. 68. № 2. С. 289–293.
 7. *Пячин С.А., Заводинский В.Г., Чебуряк Ю.А.* Оценка коэффициентов взаимной диффузии переходных металлов при электроискровом легировании тантала // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 3. С. 59–65.
 8. *Душенко В.Ф., Гитлевич А.Е.* О возможном механизме диффузии при электроискровом легировании и других видах импульсного воздействия на металлы // Электронная обработка материалов. 1980. № 3. С. 36–39.

INFLUENCE OF TEMPERATURE OF A SUBSTATE ON DIFFUSION IN IRON AND COPPER AT ELECTROSPARK TREATMENT

V. Mazanko, E. Khranovskaia, E. Ivaschenko*, S. Vorona

*G.V. Kurdumov Metalphysics Institute NAS of Ukraine
Nonstationary diffusion Department
Vernadskogo Str., 36, UA-03680 Kiev, Ukraine*

**National Technical University of Ukraine (“Kiev Polytechnical Institute”)
Physics of metals Department
Peremogi Prosp. 37, UA-03056 Kiev, Ukraine
e-mail: katya@online.com.ua*

Features of diffusion of radioactive ^{63}Ni isotope in copper and iron in conditions of electrospark treatment at a room temperature (293) and at temperature of fluidic nitrogen (77) were investigated by method of radioactive isotopes.

It is established, that depth of permeation of radioactive ^{63}Ni isotope in metals and the molding box of a concentration curve essentially depend by nature processable metal and initial temperature of a sample. Dipping of temperature of iron up to 77 leads to reduction of extent diffusion zones approximately three times, and in copper - to its increase in as much time. Besides on a concentration curve of distribution of radioactive ^{63}Ni isotope in copper after treatment at 77 on depth ~ 7 microns are formed precisely expressed maximum of concentration of nickel.

The received results are analyzed from the point of view of migration of the dot defects arising at an electrospark alloying and operation on them of an electric current and thermal stresses.

Key words: iron, copper, electrospark treatment.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006

Прийнята до друку 09.06.2008