



УДК 534.2

© 2008

В. Ф. Мазанко, К. М. Храновська, В. М. Стаценко

## Вплив карбіду кремнію на мікроструктуру та фазовий склад залізної мішені

(Представлено членом-кореспондентом НАН України Ю. М. Ковалем)

*Microscopic structures and the phase composition of an iron target which are formed at alloying by silicon carbide are investigated by electronic and optical microscopies and X-ray analysis. It is established that the combination of complex actions of repeated pulsing mechanical shocks and a pulsing current leads to superdeep penetration of SiC into an iron target. It is shown that the machining under specified conditions leads to the formation of a structure of iron including its silicides and corpuscles of a SiC powder.*

Легування виробів з металів та сплавів порошками різного складу є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів. Найбільш ефективними є динамічні способи легування. Однак до недавнього часу вважалося, що частинки при ударній взаємодії з твердими тілами, які деформуються, можуть проникати у них на невелику глибину, яка складає лише декілька їх діаметрів. Водночас у 80-х роках ХХ століття було з'ясовано, що у деяких випадках частинки можуть проникати у тверді тіла на глибину, яка перевищує  $10^3$  їх радіуса. Це явище називається ефектом надглибокого проникнення [1]. У роботі [2] наведено умови, за яких він реалізується. Глибина проникнення частинок із середнім розміром 100 мкм в матеріал перешкоди (мішені) сягає декількох сантиметрів. При цьому доля частинок, яка проникає у мішень, складає близько 1%. Розгін частинок здійснюється за допомогою вибухового прискорювача (швидкість частинок досягає 1 км/с).

Недоліками розглянутого методу легування є обмежена кількість порошку, що проникає у матеріал мішені (як відзначено вище, близько 1%), а також необхідність застосування складної в експлуатації техніки.

У зв'язку з цим виникла необхідність пошуку нових фізичних підходів та технологічних прийомів для спрощення та підвищення ефективності способу обробки металів та сплавів, який розглядається. Вирішенню цих задач і присвячена дана робота.

**Матеріали та методики експерименту.** Зразки (мішені) з технічного заліза (99,9% Fe) мали форму пластинки з розмірами  $10 \times 100 \times 0,5$  мм. Використовували частинки карбіду кремнію SiC сферичної форми із середнім розміром 50 мкм. Обробку зразків здійснювали на

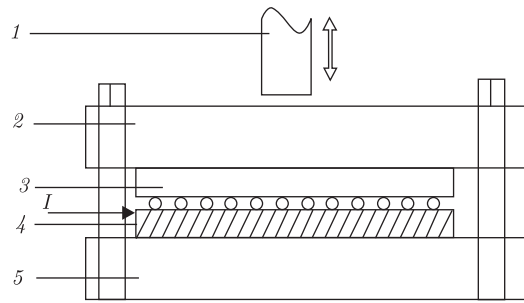


Рис. 1. Схема розміщення плит при легування залізної мішені карбідом кремнію: 1 — ударник; 2 — сталевна плита; 3 — залізна плита; 4 — залізна мішень; 5 — сталевна плита. Двостороння стрілка вказує напрям руху ударника, одностороння — напрям протікання струму; кружечками позначено порошок SiC

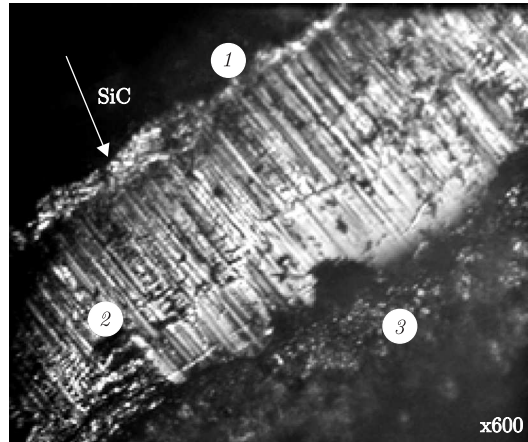


Рис. 2. Мікроструктура перерізу залізної мішені після легування порошком SiC

спеціально розробленій установці (рис. 1) за кімнатної температури в умовах комплексної дії вздовж мішені імпульсного струму густиною  $1 \text{ А/мм}^2$  та імпульсного механічного ударного впливу з частотою 50 Гц по сталевій плиті розміром  $20 \times 60 \times 3 \text{ мм}$ , яка розміщується на залізній плиті розміром  $10 \times 15 \times 0,5 \text{ мм}$ , що притискає порошок до мішені. Швидкість міграції частинок у мішень складала 1–2 мкм/с, тривалість впливу — 1 год.

Дослідження мікроструктури виконані з використанням мікроскопу МІМ-8, електронного мікроскопу марки JEOL у режимі відображених електронів (мікрозондовий аналіз на вміст кремнію). Рентгеноструктурні дослідження проводились на дифрактометрі ДРОН-3 М у  $\text{CuK}\alpha$  випромінненні. Швидкість зйомки становила 0,1 градуса за хвилину.

**Результати та їх обговорення.** Результати дослідження мікроструктури перерізу залізної мішені після легування її порошковими частинками SiC наведено на рис. 2. На знімку спостерігаються три області: шар порошку, який не потрапив до мішені (1), область перерізу мішені, на якій спостерігаються канали, що формуються внаслідок впровадження порошку (2), та тильна сторона перерізу, вздовж якої він накопичується (3), після проходження вздовж мішені.

Рентгенограма перерізу залізної мішені після легування порошком SiC демонструє присутність основної фази силіциду  $\text{FeSi}_2$ , є лінії  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\alpha - \text{Fe}$  та SiC. Порівняння отриманої рентгенограми з рентгенограмою для вихідного заліза надало змогу зробити висновок про

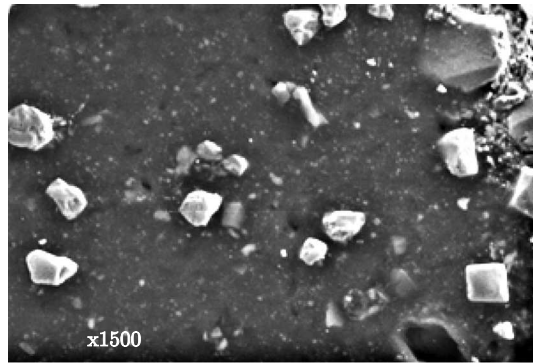


Рис. 3. Електронно-мікроскопічний знімок перерізу залізної мішені, насиченої карбідом кремнію

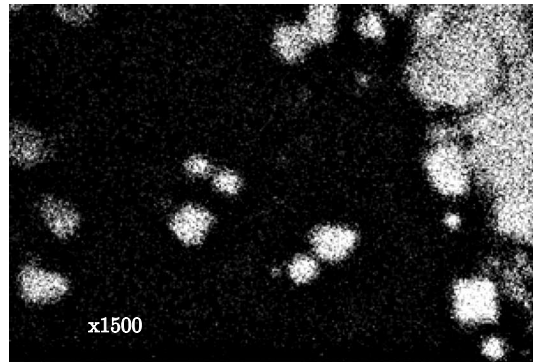


Рис. 4. Розподіл кремнію по перерізу залізної мішені після легування порошком карбиду кремнію, знятий у режимі відображених електронів Si

те, що кількість та інтенсивність ліній для  $\alpha$  — Fe зменшується, натомість вміст силіцидів заліза у мішені збільшується. Відсутність рефлексів від  $Fe_3C$  можна пояснити тим, що вуглець, який утворюється при розпаді  $SiC$ , переважно знаходиться у атомарному стані в мікротріщинах, які утворюються при ударній обробці.

Результати дослідження мікроструктури перерізу залізної мішені насиченої карбідом кремнію демонструє рис. 3, звідки видно, що розміри та форма частинок  $SiC$  досить суттєво відрізняються від їх вихідної сферичної форми. Частинки невеликого розміру, що спостерігаються на знімку, можуть бути силіцидами заліза.

Аналіз розподілу кремнію по перерізу залізної мішені наведений на рис. 4. На знімку спостерігаються області скупчення кремнію (світлі плями), що входять до складу карбиду кремнію, та невеликі за розміром білі точки, що можуть бути ідентифіковані як кремній, що входять до складу силіцидів заліза.

Експериментальні результати, отримані в даній роботі, можна пояснити таким чином. При імпульсному механічному ударному впливові формується розвинута дислокаційна структура. В той же час, відбувається розпад порошку  $SiC$  на складові Si та C подібно до того, як це має місце у випадку розпаду цементиту при ППД [3]. На наш погляд, структурний стан системи Fe— $SiC$  визначається рівновагою заліза (матриці), порошку  $SiC$  та тим, що утворюється внаслідок розпаду  $SiC$  на Si та C. Пластична деформація, що має місце при ударній обробці, сприяє прискореному переносу атомів вуглецю з  $SiC$  до дислокацій, з наступним утворенням атмосфер Коттрелла. Натомість кремній має більше хімічне

споріднення до заліза порівняно з вуглецем, тому відбувається розпад SiC з подальшим утворенням силіцидів заліза із різним стехіометричним складом, що підтверджується даним рентгенофазового аналізу. Комплексний вплив на залізу мішень імпульсного струму та перпендикулярно направлено відносно неї імпульсного ударного механічного впливу сприяє проникненню частинок порошку в неї внаслідок короткочасного зниження міцності зсуву на фронті ударної хвилі, подібно до того, як це відбувається у випадку надглибокого проникнення частинок в активоване пружно-пластичне середовище [4]. Такий стан, що сприяє проникненню порошкового матеріалу у мішень, досягають за рахунок імпульсного ударного впливу. Посиленню збудження, що призводить до ще більшого проникнення порошку у мішень, сприяє збільшення амплітуди коливань атомів у вузлах кристалічної ґратки матеріалу нагріванням мішені внаслідок пропускання електричного струму крізь неї. Багатократність впливу забезпечує максимальне проникнення порошкового матеріалу у мішень.

Отже, поєднання комплексної дії багатократного імпульсного механічного ударного впливу та імпульсного струму призводить до надглибокого проникнення порошку SiC у залізу мішень, а також підвищує ефективність процесу легування внаслідок збільшення долі частинок, які потрапляють у неї.

1. *Андишевко С. К., Романов Г. С., Уширенко С. М.* Сверхглубокое проникание дискретных микрочастиц // Всесоюз. совещание по детонации. – Красноярск, 1991. – С. 38–42.
2. *Уширенко С. Н.* Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. – Минск: Изд. НИИ импульсных процессов, 1998. – 209 с.
3. *Гаврилюк В. Г.* Распределение углерода в стали. – Киев: Наук. думка, 1987. – 208 с.
4. *Колмагоров В. Л., Залазинский А. Г., Залазинская Е. А.* О сверхглубоком проникании частицы в упругопластическую среду // VII Забабахинские научные чтения. – Снежинск, 2003. – С. 1–16.
5. *Алексенцева С. Е., Кривченко А. Л.* Анализ условий сверхглубокого проникания порошковых частиц в металлическую матрицу // Журн. техн. физики. – 1998. – 86, № 7. – С. 124–125.

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

*Надійшло до редакції 15.02.2008*