

PACS numbers: 61.43.Gt, 61.72.Dd, 68.37.Hk, 75.50.Tt, 81.07.Wx, 81.20.Ev, 81.40.Rs

## Вплив режимів електроіскряного оброблення на формування твердих розчинів у стопах міді з залізом і кобальтом

В. М. Надутов, А. О. Перекос, Б. М. Мордюк, В. З. Войнаш,  
Т. В. Єфімова, В. П. Залуцький, Т. Г. Кабанцев

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

Методами рентгеноструктурної аналізи, електронної мікроскопії та магнетометрії досліджено структуру, фазовий склад, дисперсність і магнетні властивості високодисперсних порошків стопів міді з залізом і кобальтом, одержаних методом електроіскряного оброблення у дистильованій воді, етиловому спирті та гасі. Показано, що у процесі електроіскряного оброблення в порошках формуються пересичені тверді розчини між міддю, залізом і кобальтом та їхні оксиди  $\text{CoO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$  й карбіди  $\text{Co}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_2\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , кількість яких істотно залежить від типу робочої рідини. Крім того, показано, що електроіскряне оброблення приводить до значного подрібнення структури; при цьому форма частинок порошків близька до сферичної, а їхні розміри знаходяться в інтервалі від 0,1 до 10 мкм. Концентрація металів у твердих розчинах після електроіскряного оброблення набагато (на 2–3 порядки) перевищує рівноважні значення концентрації для цих систем у масивних зразках. Магнетні властивості порошків стопів  $\text{Cu-Co}$  і  $\text{Cu-Fe}$  визначаються їхніми фазовим складом і дисперсністю, які залежать від робочої рідини.

**Ключові слова:** високодисперсні порошки, магнетні властивості, рентгеноструктурна аналіза, електронна мікроскопія, магнетометрія.

Corresponding author: Bohdan Mykolayovych Mordyuk  
E-mail: mordyuk@imp.kiev.ua

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. M. Nadutov, A. O. Perekos, B. M. Mordyuk, V. Z. Voynash, T. V. Efimova, V. P. Zalutsky, and T. G. Kabantsev, Influence of Modes of Electrospark Treatment on Formation of Solid Solutions in Alloys of Copper with Iron and Cobalt, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 3: 327–338 (2018) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.40.03.0327.

The structure, phase composition, dispersion, and magnetic properties of fine powders of copper with iron and cobalt obtained by electrospark method in distilled water, ethanol, and kerosene are investigated by X-ray analysis, electron microscopy and magnetometry methods. As shown, oversaturated solid solutions of copper with iron and cobalt as well as their oxides (CoO, Cu<sub>2</sub>O, FeO) and carbides (Co<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C) are formed in powder blends during electrospark treatment. The quantities of oxides and carbides essentially depend on the type of working liquid. As shown, electrospark treatment leads to considerable structure changes, particle shape becomes near spherical, and their sizes are within the range from 1 to 10 μm. Concentrations of metals in solid solutions after electrospark treatment exceed much (by 2–3 orders of magnitude) the equilibrium values of concentrations for these systems in bulk specimens. Magnetic properties of fine powders of the Cu–Co and Cu–Fe alloys are determined by their phase composition and dispersity, which depend on the working liquid.

**Key words:** finely dispersed powders, magnetic properties, X-ray structural analysis, electron microscopy, magnetic measurements.

Методами рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії та магнітометрії дослідовані структура, фазовий склад, дисперсність та магнітні властивості високодисперсних порошків міді з залізом та кобальтом, отриманих методом електроіскрової обробки в дистильованій воді, етиловому спирті та керосині. Показано, що в процесі електроіскрової обробки в порошках формуються пересичені тверді розчини між міддю, залізом та кобальтом, а також їх оксиди CoO, Cu<sub>2</sub>O, FeO та карбідів Co<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C, кількість яких суттєво залежить від типу робочої рідини. Крім того, показано, що електроіскрова обробка призводить до значительного дрібнення структури. При цьому форма частинок порошків близька до сферичної, а їх розміри знаходяться в інтервалі від 0,1 до 10 мкм. Концентрація металів в твердих розчинах після електроіскрової обробки набагато (на 2–3 порядки) перевищує рівновесні значення концентрації для цих систем в масивних зразках. Магнітні властивості порошків сплавів Cu–Co та Cu–Fe визначаються їх фазовим складом та дисперсністю, які залежать від робочої рідини.

**Ключевые слова:** высокодисперсные порошки, магнитные свойства, рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, магнитометрия.

*(Отримано 18 січня 2018 р.)*

## 1. ВСТУП

Відомо, що в процесі електроіскряного оброблення (ЕІО) матеріал зазнає значних механічних навантажень, близьких до його межі плинності, та нагрівається до високих температур, часто вищих за його температуру топлення [1]. Розтоплені краплинки та тверді розжарені частинки матеріалу електродів під дією електроіскря-

ного розряду потрапляють в оточуючу електроди робочу рідину, що приводить до їх надшвидкого охолодження. Крім цього, атоми металів, що входять до складу матеріялу електродів, у процесі охолодження, як правило, активно взаємодіють з атомами та молекулами робочої рідини. Перелічені чинники свідчать про те, що ЕЮ може істотно впливати на структуру, фазовий склад та дисперсність матеріялів [1].

У нашій роботі для дослідження впливу ЕЮ на структурні та магнетні характеристики матеріялів були використані високодисперсні порошки (ВДП) стопів Cu–66,6 ат.% Co і Cu–50 ат.% Fe, одержані в різних рідинах — дистильованій воді, етиловому спирті та гасі.

## 2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктами досліджень у даній роботі були ВДП стопів Cu–Co і Cu–Fe. Стопи міді з кобальтом Cu–66,6 ат.% Co та залізом Cu–50 ат.% Fe виготовляли індукційним способом в атмосфері аргону. Такий хемічний склад стопів був вибраний таким для того, щоб інтенсивності ліній від елементарних металів на дифрактограмах були однаковими чи близькими за величиною, що робить спостереження за процесами розчину та фазоутворення в КЗПС більш точним і наглядним. Високодисперсні порошки одержували методом електроіскряного диспергування (ЕІД) [1] у трьох рідких середовищах — дистильованій воді, етанолі та гасі. Після закінчення процесу диспергування частинки порошку осаджували в робочій рідині та висушували при кімнатній температурі на повітрі.

Для дослідження морфологічних особливостей структури вихідних порошоків було використано сканувальний електронний мікроскоп NeoScore ISM-5000 фірми JEOL. Рентгеноструктурні дослідження проводили на рентгєнівському дифрактометрі ДРОН-3.0 у кобальтовому випромінєнні. Розміри областей когерентного розсіяння (ОКР) визначали за розширенням рентгєнівських ліній на дифрактограмах за формулою Селякова–Шеррера [2, 3]. Фазову аналізу здійснювали за відношенням інтенсивностей найсильніших ліній наявних кристалічних фаз на дифрактограмах. Магнетні міряння проводили за допомогою балістичного магнетометра в інтервалі полів до 800 кА/м при кімнатній температурі.

За процесом розчиноутворення у стопах і порошоків сумішах зручно безпосередньо спостерігати, вимірюючи параметри ґратниць та намагнетованість насичення. Справа в тому, що параметри ґратниці бінарних твердих розчинів металів часто у першому наближенні змінюються лінійно в залежності від концентрації компонентів (правило Vegarda) [4–5]:

$$a \cong a_1 + (a_2 - a_1)c_2 = a_1 + (a_2 - a_1)(1 - c_1),$$

де  $a$ ,  $a_1$  і  $a_2$  — параметри ґратниць твердого розчину й обох компонентів, а  $c_1$  і  $c_2$  — концентрації компонентів в атомних долях.

Таке припущення дозволяє одержати для концентрації одного із компонентів твердого розчину, наприклад 2, (в атомних долях) наступну формулу:

$$c_2 = (a - a_1)/(a_2 - a_1).$$

Для концентрацій кобальту чи заліза у твердих розчинах з міддю це дає:

$$c_{\text{Co}} = \frac{a - a_{\text{Cu}}}{a_{\text{Co}} - a_{\text{Cu}}} = 1,429 \cdot 10^4 (a - a_{\text{Cu}}), \text{ ат. \%} \quad \text{— для стопів Cu–Co,} \quad (1)$$

$$c_{\text{Fe}} = \frac{a - a_{\text{Cu}}}{a_{\text{Fe}} - a_{\text{Cu}}} = 3,155 \cdot 10^4 (a - a_{\text{Cu}}), \text{ ат. \%} \quad \text{— для стопів Cu–Fe,} \quad (2)$$

де  $a$ ,  $a_{\text{Co}}$ ,  $a_{\text{Cu}}$  і  $a_{\text{Fe}}$  — параметри ґратниць стопу, кобальту, міді та заліза, а  $c_{\text{Co}}$ ,  $c_{\text{Cu}}$  і  $c_{\text{Fe}}$  — їхні концентрації у твердих розчинах відповідно.

Значення параметрів ґратниць взято із довідника Барабаша і Коваля [5].

За процесом формування твердих розчинів в феромагнетних стопах можна також слідкувати, вимірюючи намагнетованість насичення феромагнетних стопів, яка, зазвичай, для бінарних стопів заліза, кобальту та нікелю з немагнетними металами зменшується в залежності від концентрації немагнетних компонент, причому для багатьох бінарних стопів це зменшення має лінійний характер (наприклад, для стопів нікелю з міддю, алюмінієм, кремнієм, титаном) [6–7].

Згідно з моделлю Фріделя–Слетера–Полінґа залежність магнетного моменту насичення, визначеного в магнетонах Бора на атом Co, Fe чи Ni, від концентрації немагнетних металів таких, як Al, Si, Ti, V, Zn, Cu, можна подати в такому вигляді [8–9]:

$$d\mu/dc = - 2,2 \quad \text{— для стопів Fe–Cu,}$$

$$d\mu/dc = - 2,0 \quad \text{— для стопів Co–Cu,}$$

що для питомої намагнетованості наситу  $\sigma$  дає

$$\sigma = \sigma_{\text{Fe}} - 2,2\sigma_{\text{Fe}}c, \quad \sigma = \sigma_{\text{Co}} - 2,0\sigma_{\text{Co}}c.$$

У написаних формулах  $\mu$  і  $c$  — магнетний момент наситу в ма-

гнетонах Бора на атом і концентрація стопу;  $\sigma$ ,  $\sigma_{\text{Fe}}$  і  $\sigma_{\text{Co}}$  — питомі намагнетованості насату стопу, заліза та кобальту.

З останніх двох формул легко визначити концентрацію стопу:

$$c = 45,5 \frac{\sigma_{\text{Fe}} - \sigma}{\sigma_{\text{Fe}}}, \text{ ат.}\% \text{ — для стопів Fe-Cu,} \quad (3)$$

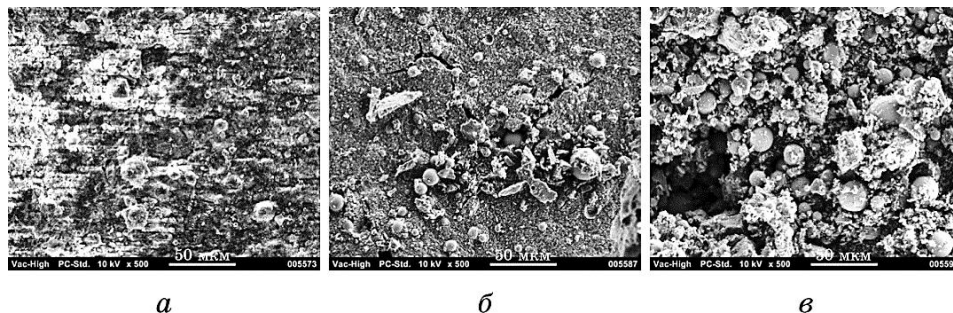
$$c = 50 \frac{\sigma_{\text{Co}} - \sigma}{\sigma_{\text{Co}}}, \text{ ат.}\% \text{ — для стопів Co-Cu.} \quad (4)$$

Варто зазначити, що лінійна апроксимація концентраційних залежностей параметрів ґратниць і намагнетованостей є тільки першим наближенням, і в реальній ситуації вони часто порушуються. Це обумовлено тим, що конкретний вид цих залежностей визначається типом силової та енергетичної взаємодії між різнорідними атомами і характером зонної структури твердого розчину, які, власне, і визначають як міжатомову віддаль, так і величину намагнетованості насичення твердого розчину [10–12]. Разом з тим, використання формул (1)–(4) для визначення концентрації компонент бажане, адже це дає хоча би якісне уявлення про процеси розчиноутворення в стопах при їх інтенсивному механічному навантаженні.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

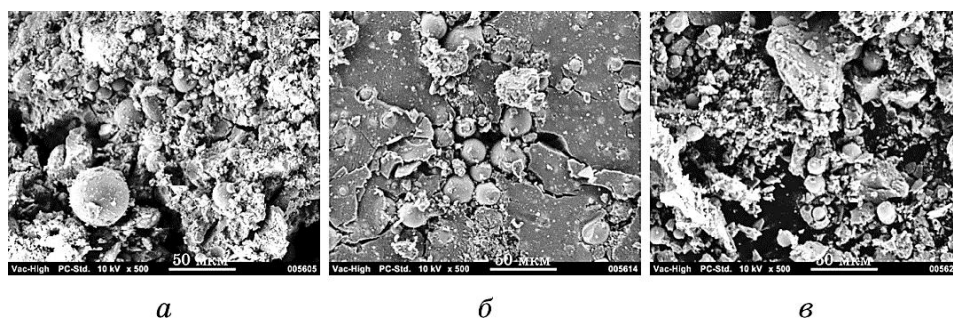
Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 1–6 та в табл. 1–3.

На рисунках 1 та 2 наведено мікрофотографії порошоків стопів Cu-Co і Cu-Fe, одержаних у воді, етанолі та гасі.



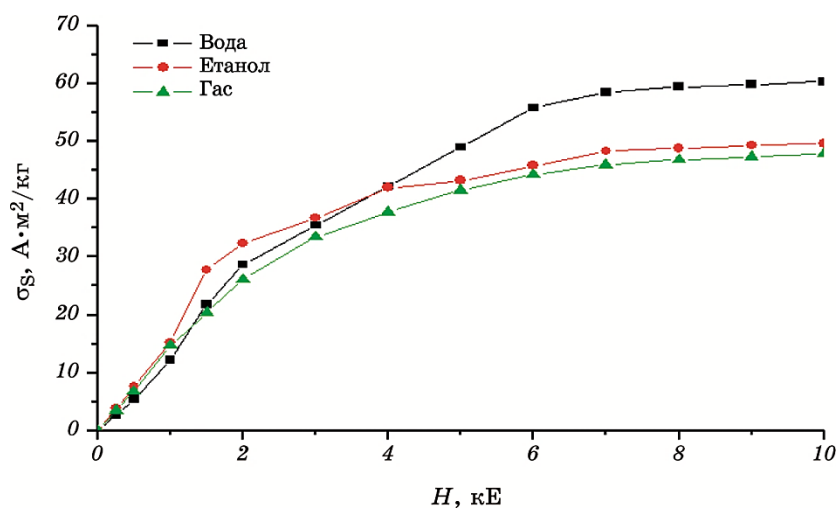
**Рис. 1.** ВДП стопу Cu-Fe, одержаних в дистильованій воді (а), етанолі (б) і гасі (в).

**Fig. 1.** Ultrafine Cu-Fe alloy powder obtained in distilled water (a), ethanol (b) and kerosene (c).



**Рис. 2.** ВДП ступу Cu–Co, одержаних в дистильованій воді (а), етанолі (б) і гасі (в).

**Fig. 2.** Ultrafine Cu–Co alloy powder obtained in distilled water (a), ethanol (b) and kerosene (c).



**Рис. 3.** Польові залежності питомої намагнетованості ВДП ступу Cu–Co, одержаних у дистильованій воді, етанолі та гасі.

**Fig. 3.** Field dependences of specific magnetization of ultrafine Cu–Co alloy powder obtained in distilled water, ethanol and kerosene.

Наведені мікрофотографії свідчать про те, що частинки порошоків, одержаних методом ЕІД, мають форму, близьку до сферичної, а їх розміри знаходяться в інтервалі від 0,1 до 20 мкм. Більшість частинок дрібної фракції об'єднано у конгломерати, розміри яких значно більші за розміри частинок.

Видно також, що вибір робочої рідини мало впливає на форму та розміри частинок. Навпаки, як і варто було очікувати, фазо-

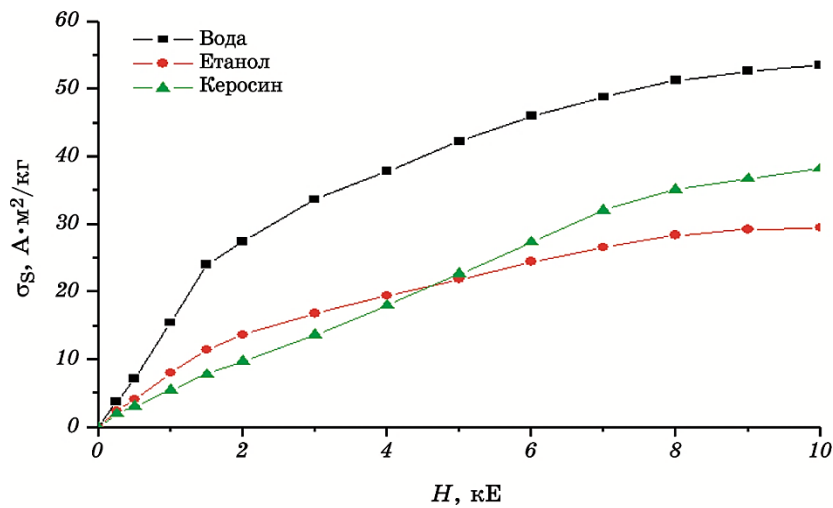


Рис. 4. Польові залежності питомої намагнетованості ВДП ступу Cu–Fe, одержаних в дистильованій воді, етанолі та гасі.

Fig. 4. Field dependences of specific magnetization of ultrafine Cu–Fe alloy powder obtained in distilled water, ethanol and kerosene.

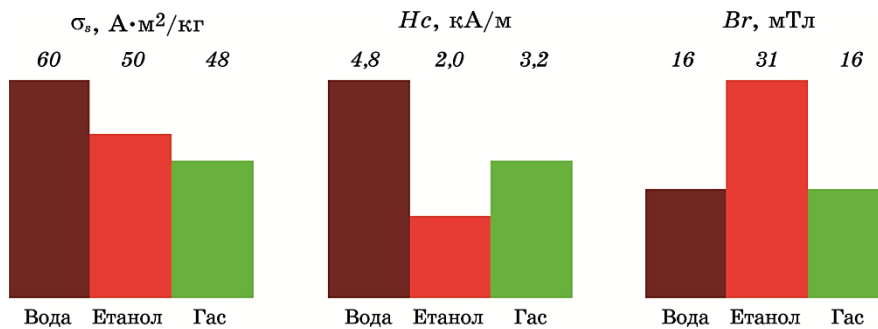
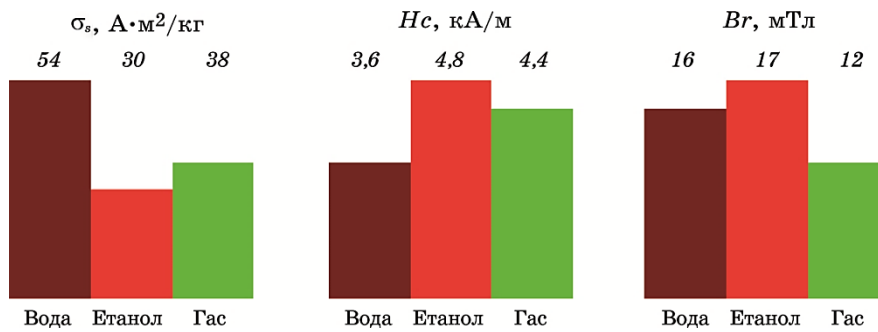


Рис. 5. Намагнетованість насичення  $\sigma_s$ , коерцитивна сила  $H_c$  та залишкова індукція  $Br$  ВДП ступу Cu–Co в залежності від типу робочої рідини.

Fig. 5. Saturation magnetization  $\sigma_s$ , coercive force  $H_c$  and residual induction  $Br$  of ultrafine powders of Cu–Co alloy dependent on the type of the working liquid.

вий склад одержуваних порошків істотно залежить від вибору робочої рідини. Цю залежність демонструють результати рентгеноструктурних досліджень, наведених у табл. 1 та 2.

У таблиці 1 наведено результати обчислень фазового складу та розмірів ОКР ВДП ступу Cu–Co, одержаних в різних рідинах —



**Рис. 6.** Намагнетованість насичення  $\sigma_s$ , коерцитивна сила  $H_c$  та залишкова індукція  $B_r$  ступу Cu–Fe в залежності від типу робочої рідини.

**Fig. 6.** Saturation magnetization  $\sigma_s$ , coercive force  $H_c$  and residual induction  $B_r$  of ultrafine powders of Cu–Fe alloy dependent on the type of the working liquid.

дистильованій воді, етанолі та гасі, а в табл. 2 — результати обчислень фазового складу та розмірів ОКР ВДП ступу Cu–Fe, одержаних у тих же рідинах.

Наведені результати свідчать про те, що ЕЮ обох ступів приводить до формування в порошках твердих розчинів на основі

**ТАБЛИЦЯ 1.** Фазовий склад, дисперсність, параметри ґратниць, питома намагнетованість насичення твердих розчинів (Cu–Co) і (Co–Cu) та концентрація кобальту і міді у ВДП ступі (Cu–Co), одержаних в різних рідинах.

**TABLE 1.** Phase composition and size of ultra-fine powder of Cu–Co alloy, obtained in different liquids.

| Зразок | Фазовий склад          | Фазовий склад, % | Розміри ОКР, нм | Параметри ґратниць, нм | Концентрація, % | $\sigma_s$ , A·m <sup>2</sup> /kg | $c$ , % (мідь) |
|--------|------------------------|------------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------------|
| Масив  | Cu                     | 45               | 220             | 0,3615                 | –               | 130                               |                |
|        | Co                     | 55               | 90              | 0,3545                 | –               |                                   |                |
| Вода   | Cu–Co                  | 84               | 70              | 0,3617                 | 3,6 (Co)        | 60                                | 27             |
|        | Co–Cu                  | 8                | 55              | 0,3562                 | 24 (Cu)         |                                   |                |
|        | Cu <sub>2</sub> O, CoO | 8                | 65              | –                      | –               |                                   |                |
| Етанол | Cu–Co                  | 70               | 20              | 0,3616                 | 1,8 (Co)        | 50                                | 33             |
|        | Co–Cu                  | 20               | 20              | 0,3585                 | 38 (Cu)         |                                   |                |
|        | Co <sub>3</sub> C      | 10               | 20              | –                      | 0 (Co)          |                                   |                |
| Гас    | Cu–Co                  | 80               | 90              | 0,3615                 | 0 (Co)          | 48                                | 32             |
|        | Co–Cu                  | –                | –               | –                      | –               |                                   |                |
|        | Co <sub>3</sub> C      | 20               | 15              | –                      | –               |                                   |                |



**ТАБЛИЦЯ 2.** Фазовий склад, дисперсність, параметри ґратниць, питома намагнетованість насичення твердих розчинів (Cu–Fe) і (Fe–Cu) та концентрація заліза і міді у ВДП стопі (Cu–Fe), одержаних в різних рідинах.

**TABLE 2.** Phase composition and size of ultra-fine powder of Cu–Fe alloy, obtained in different liquids.

| Зразок | Фазовий склад     | Фазовий склад, % | Розміри ОКР, нм | Параметри ґратниць, нм | Концентрація, % | $\sigma_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг | c, % (мідь) |
|--------|-------------------|------------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------|
| Масив  | Cu                | 55               | 15              | 0,3615                 | –               | 110                               | 0           |
|        | Fe                | 45               | 20              | 0,2866                 | –               |                                   |             |
| Вода   | Cu–Fe             | 55               | 25              | 0,3621                 | 9 (Fe)          | 54                                | 23          |
|        | Fe–Cu             | 40               | 25              | 0,2873                 | 15 (Cu)         |                                   |             |
|        | FeO               | 5                | 30              | –                      | –               |                                   |             |
| Етанол | Cu–Fe             | 65               | 110             | 0,3620                 | 8 (Fe)          | 39                                | 29          |
|        | Fe–Cu             | 25               | 35              | 0,2879                 | 29 (Cu)         |                                   |             |
|        | Fe <sub>2</sub> C | 10               | 35              | –                      | –               |                                   |             |
| Газ    | Cu–Fe             | 80               | 30              | 0,3620                 | 8 (Fe)          | 38                                | 29          |
|        | Fe–Cu             | 8                | 30              | 0,2878                 | 28 (Cu)         |                                   |             |
|        | Fe <sub>2</sub> C | 10               | 30              | –                      | –               |                                   |             |
|        | Fe <sub>3</sub> C | 2                | 25              | –                      | –               |                                   |             |

міді, заліза та кобальту. Крім того, у ВДП, одержаних в дистильованій воді, з'являються оксиди металів: CoO, Cu<sub>2</sub>O, FeO, а одержаних в етанолі і газі — карбіди заліза та кобальту: Co<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>C, Fe<sub>3</sub>C.

Кількість зазначених фаз істотно залежить від типу робочої рідини. Так, кількість твердого розчину кобальту в міді Cu–Co найбільша у ВДП, одержаному в дистильованій воді (84%), а найменша — у ВДП, одержаному в етанолі (70%). Так само, наприклад, кількість твердого розчину заліза в міді Cu–Fe найбільша у ВДП, одержаному в газі (80%), а найменша — у ВДП, одержаному в дистильованій воді (55%).

Вміст оксидів і карбідів у порошках також визначається типом робочої рідини: оксиди металів присутні лише у ВДП, одержаних у дистильованій воді; при цьому оксиду заліза FeO у ВДП стопу Cu–Fe лише 5%, а кількість оксидів кобальту та міді CoO та Cu<sub>2</sub>O у ВДП стопу Cu–Co сягає 8%. Карбіди заліза Fe<sub>2</sub>C та Fe<sub>3</sub>C та кобальту Co<sub>3</sub>C присутні як в порошках, одержаних в етанолі, так і у порошках, одержаних у газі. При цьому кількість карбідів загалом вища у ВДП, одержаних у газі (сягає 20%), ніж одержаних в етанолі (не перевищує 10%).

Вплив ЕІО на магнетні властивості ВДП стопів Cu–Co і Cu–Fe

можна простежити, аналізуючи результати магнетних вимірювань, показаних на рис. 3–6. Стосовно структурно чутливих магнетних характеристик  $H_c$  та  $B_r$  можна зауважити лише те, що їхня величина залежить як від стопу, так і від робочої рідини, але для повного розуміння цих залежностей необхідна детальна інформація про наявність та величину механічних напружень, розміри частинок феромагнетних і неферомагнетних фазових складових та характер їх розподілу в матеріалі. Але подібне завдання не ставилось у даній роботі — воно може бути предметом подальших досліджень. Еволюції питомої намагнетованості  $\sigma_s$  більш прогнозовані і можна пояснити формуванням у ВДП твердих розчинів заліза та кобальту з міддю та наявністю в порошках оксидів і карбідів, котрі мають нижчі значення  $\sigma_s$ , ніж масивні стопи ( $\cong 130 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$  для стопу  $\text{Cu-Co}$  і  $\cong 110 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$  для стопу  $\text{Cu-Fe}$ ). При цьому спостерігається цілком зрозуміла закономірність — чим більше оксидів чи карбідів у ВДП, тим менші значення їхньої питомої намагнетованості  $\sigma_s$  (табл. 1 і 2 та рис. 5–6). Сам хід польових залежностей питомої намагнетованості порошків характерний для феромагнетного матеріалу з низьким значенням коерцитивної сили та хаотичним розподілом магнетних моментів однодомених частинок в немагнетному середовищі (рис. 3 та 4).

Про формування твердих розчинів у ВДП стопів  $\text{Cu-Co}$  і  $\text{Cu-Fe}$  у процесі ЕІД свідчать розрахунки концентрації заліза, кобальту та міді, виконано з використанням формул (1)–(4) та наведено в табл. 1 та 2. Згідно з розрахунками концентрації металів за зміною параметрів ґратниць ЕІО приводить до значного взаємного розчинення атомів металів. Так, наприклад, концентрація кобальту в твердому розчині  $\text{Cu-Co}$  може досягати 3,6%, міді в твердому розчині  $\text{Co-Cu}$  — 38% (табл. 1), що значно перевищує рівноважні значення для цих систем [5]. Така ж ситуація виникає і при розгляді результатів впливу ЕІО на процес розчиноутворення в системі  $\text{Cu-Fe}$ , котрих наведено в табл. 2. За результатами рентгенівських обчислень в залежності від робочої рідини концентрація заліза в твердому розчині  $\text{Cu-Fe}$  змінюється в межах від 8 до 9%, а міді в твердому розчині  $\text{Fe-Cu}$  — від 15 до 29%.

Розрахунки концентрації металів у твердих розчинах, проведені за зміною питомої намагнетованості насичення ВДП з використанням формул (3)–(4), призводять до близьких значень, що підтверджує достовірність проведених розрахунків (табл. 1 і 2). Незначна розбіжність між значеннями концентрації міді в твердих розчинах  $\text{Co-Cu}$  і  $\text{Fe-Cu}$ , обчислених за допомогою рентгенівських і магнетних вимірювань, очевидно можна пояснити в першу чергу наближеністю формул (1)–(4), про що було сказано в розд. 2, а також тим, що питома намагнетованість насичення за-

ліза та кобальту зменшується не лише за рахунок розчинення в них міді, а також завдяки утворенню у ВДП оксидів і карбідів заліза та кобальту (табл. 1–2), які мають значно менші значення питомої намагнетованості насичення у порівнянні з чистими металами [6].

Варто зазначити, що для ВДП стопу Cu–Fe параметри ґратниць твердих розчинів як на основі міді, так і на основі заліза збільшуються при розчиненні в них заліза та міді відповідно (табл. 1), що узгоджується із табличними даними [5]. Така сама ситуація має місце і для ВДП стопу Cu–Co: параметри ґратниць твердих розчинів збільшуються як при розчиненні міді в кобальті, так і при розчиненні кобальту в міді. Очевидно, це зумовлено відхилом параметрів ґратниць при утворенні твердих розчинів від правила Vegarda [2, 5].

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Електроіскряне оброблення стопів Cu–Co і Cu–Fe приводить до формування високодисперсних порошоків, що містять в собі тверді розчини на основі міді, заліза та кобальту. Крім того у ВДП з'являються оксиди CoO, Cu<sub>2</sub>O і FeO та карбіди Co<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>C і Fe<sub>3</sub>C металів, кількість яких суттєво залежить від робочої рідини.
2. Форма частинок ВДП близька до сферичної, а їх розміри знаходяться в інтервалі від 0,1 до 20 мкм. Вибір робочої рідини мало впливає на форму та розміри частинок.
3. Концентрація металів у твердих розчинах ВДП стопів Cu–Co і Cu–Fe після ЕІО набагато (2–3 порядки) перевищує рівноважні значення концентрації для цих систем.
4. Магнетні властивості порошоків стопів Cu–Co і Cu–Fe визначаються їх фазовим складом та дисперсністю, які залежать від робочої рідини, в якій проводилась ЕІО.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. К. В. Чуистов, А. П. Шпак, А. Е. Перекос, О. Д. Рудь, В. М. Уваров, *Успехи физики металлов*, 4, вып. 4: 235 (2003).
2. В. И. Иверонова, Г. П. Ревкевич, *Теория рассеяния рентгеновских лучей* (Москва: Изд. МГУ: 1972).
3. С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев, *Рентгенографический и электронно-оптический анализ* (Москва: МИСиС: 1994).
4. Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, *Физика металлов* (Москва: Атомиздат: 1978).
5. О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль, *Кристаллическая структура металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 1986).
6. Р. Бозорт, *Ферромагнетизм* (Москва: Иностран. лит.: 1956) (пер. з англ.).

7. С. В. Вонсовский, *Магнетизм* (Москва: Наука: 1971).
8. В. Ломер, В. Маршалл, *Теория ферромагнетизма металлов и сплавов: Сборник* (Москва: Иностр. лит.: 1963), с. 56 (пер. з англ.).
9. Дж. Голдман, А. Арротт, *Семинар по магнитным свойствам металлов и сплавов (25–26 октября 1958 г., Кливленд): Сборник докладов* (Москва: Иностр. лит.: 1961) (пер. з англ.).
10. Я. И. Френкель, *Введение в теорию металлов* (Ленинград: Наука: 1972).
11. Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий, *Физические свойства металлов и сплавов* (Москва: Металлургия: 1980).
12. А. П. Шпак, Ю. А. Куницкий, В. Л. Карбовский, *Кластерные и наноструктурные материалы* (Киев: Академперіодика: 2001).

## REFERENCES

1. K. V. Chuistov, A. P. Shpak, A. E. Perekos, O. D. Rud, and V. M. Uvarov, *Uspehi Fiziki Metallov*, **4**, Iss. 4: 235 (2003) (in Russian).
2. V. I. Iveronova and G. P. Revkevich, *Teoriya Rasseiniya Rentgenovskikh Luchey* [Theory of X-Rays Scattering] (Moscow: MGU Publishing: 1972) (in Russian).
3. S. S. Gorelik, Yu. A. Skakov, and L. N. Rastorguev, *Rentgenographicheskiy i Elektronnoopticheskiy Analiz* [X-Ray and Electrooptical Analysis] (Moscow: MISiS: 1994) (in Russian).
4. Ya. S. Umansky and Yu. A. Skakov, *Fizika Metallov* [Physics of Metals] (Moscow: Atomizdat: 1978) (in Russian).
5. O. M. Barabash and Yu. N. Koval, *Crystalline Structure of Metals and Alloys* (Kiev: Naukova Dumka: 1986) (in Russian).
6. R. M. Bozorth, *Ferromagnetism* (Moscow: Inostr. Lit.: 1956) (Russian translation).
7. S. V. Vonsovsky, *Magnetism* (Moscow: Nauka: 1971).
8. W. M. Lomer and W. Marshall, *Teoriya Ferromagnetizma Metallov i Splavov: Sbornik Statey* [Theory of Ferromagnetism of Metals and Alloys: Collected Articles] (Moscow: Inostr. Lit.: 1963) (Russian translation).
9. J. E. Goldman and A. Arrott, *Seminar po Magnitnym Svoistvam Metallov i Splavov (25–26 Oktyabrya 1958, Cleveland): Sbornik Dokladov* [Workshop on Magnetic Properties of Metals and Alloys (25–26 October, 1958, Cleveland): Collected Articles] (Moscow: Inostr. Lit.: 1961) (Russian translation).
10. Ya. I. Frenkel, *Vvedenie v Teoriyu Metallov* [Introduction to Theory of Metals] (Leningrad: Nauka: 1972) (in Russian).
11. B. G. Livshits, V. S. Kraposhin, and Ya. L. Linetskiy, *Fizicheskie Svoistva Metallov i Splavov* [Physical Properties of Metals and Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1980) (in Russian).
12. A. P. Shpak, Yu. A. Kunitskiy, and V. L. Karbovskiy, *Klasternye i Nanostrukturnye Materialy* [Clustered and Nanostructural Materials] (Kiev: Akadempriodyka: 2001) (in Russian).