

УДК 621.793

А.М. Степанчук, О.С. Богатов, Л.О. Бірюкович
Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПАКТУВАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНОЗМІЩЕНОЇ МІДІ

Background. Creation of theoretical and technological foundations of antifriction powder materials using dispersed-strengthened copper powders is urgent task, requiring a dependency determination of properties of the final product on the conditions of its receipt.

Objective. The purpose of this paper is to study the processes of obtaining products from powder materials based on dispersed-strengthened copper by hot stamping of current collector by electric vehicles. Determine the effect of parameters of stamping to form density, structure and some properties of the piece – hardness, flexural strength and specific electrical resistivity.

Methods. A processes research technique of products compacting from powder materials by hot stamping was proposed. Density, structure and properties research was conducted using modern techniques and equipment to study the mechanical properties, optical and electron microscopy, computer technology.

Results. Processes of compacting of antifriction materials of based dispersed-reinforced copper were investigated. Dependence of properties on the conditions of their production – stamping power, temperature and heating time of initial blanks before stamping was established. It was show that under certain conditions stamping density material greatly increases with the stamping power gain to 200 N·m/cm³ and herein after does not change much. Relative density of material heated to a temperature of 950 °C for 20–25 min is 99–100 %. Further increase in heating time leads to a decrease in density after stamping. The value of the hardness of the material correlates with the density. The maximum hardness is 550–600 MPa. The value of flexural strength and specific electrical resistivity also correlates with the density of the material, but also depends on the structure of the material. Maximum values of flexural strength is 180–200 MPa and minimum values of specific electrical resistance is 3.8–4.0 mOhm·cm. The results were explained using modern ideas about forming properties of powder materials when their compaction, which enables them to obtain predetermined properties.

Conclusions. Dependence of properties of antifriction materials by electric vehicles (current collector) from the conditions of their manufacture compacting porous hot stamped billets was established. Optimum conditions to obtain materials with maximum density, hardness, ultimate tensile strength and flexural specific minimum electrical output of billets are part blanks heated at the temperatures 900–950 °C for 15–20 min and their following stamping on specific energy of 200–250 N·m/cm³.

Keywords: dispersed-strengthened copper; current collector; density; hardness; flexural strength; specific electrical resistivity; heating; stamping; structure.

Вступ

Сьогодні досить широке застосування мають порошкові матеріали [1]. З них, зокрема, виготовляють вироби антифрикційного призначення [2, 3], які мають низку суттєвих переваг над традиційними. Досить широке використання порошків антифрикційні матеріали мають як контакти ковзання і серед них струмознімачі рухомого транспорту [4]. Останні працюють у складних умовах впливу зовнішніх атмосферних явищ і навантажень. Такі матеріали повинні мати поряд з високою електропровідністю високу зносостійкість, малий коефіцієнт тертя та низку інших спеціальних властивостей. Ці вимоги деякою мірою забезпечують матеріали на основі графіту, міді, заліза або їх сумішей з легувальними домішками, які надають матеріалам спеціальних властивостей залежно від умов експлуатації [2–4]. З урахуванням широкого розповсюдження антифрикційних матеріалів, що працюють в умовах ковзання, складності умов їх експлуатації, які пов'язані зі збільшенням швидкостей ковзання, нагальною потребою є удосконалення існуючих матеріалів

або розробка нових. Останнє вирішується за рахунок оптимізації складу таких матеріалів, покращення необхідних властивостей їх складових, розробки або удосконалення технології виготовлення виробів із них.

Перспективними для створення антифрикційних порошків виробів електротехнічного призначення можуть бути матеріали на основі міді. При цьому експлуатаційні властивості таких виробів можна покращити за рахунок дисперсного зміцнення матеріалу вихідних порошків [4–6]. Нами було показано [5], що такі порошки можуть бути отримані диспергуванням розплавів міді, легованої хромистим чавуном. Тому в подальшому доцільним є дослідження умов компактування матеріалів на основі таких порошків з метою визначення перспективних методів виготовлення виробів із них. У роботі [6] були вивчені умови компактування таких матеріалів пресуванням вихідних сумішей порошків з подальшим спіканням. Цей метод отримання виробів вимагає відносно великих енергетичних витрат і не завжди дає змогу отримати їх з високою щільністю і, як наслідок, необхідними експлуатаційними влас-

тивостями. В той же час одним із перспективних методів виготовлення порошкових виробів, у тому числі й антифрикційного призначення, є метод гарячої штамповки [7–9]. Цей метод належить до високоенергетичних методів компактування і дає можливість отримувати порошкові вироби високої щільності. Це зумовлено тим, що у цьому випадку матеріал виробу перебуває у пластичному стані і на процес спікання впливають не тільки капілярні сили, а й сили, прикладені зовні [8]. Тому вивчення процесів компактування виробів із нових порошкових матеріалів на основі порошоків дисперснозміцненої міді є досить актуальною задачею.

Постановка задачі

Метою роботи є: вивчення процесів отримання виробів із порошкових матеріалів на основі дисперснозміцненої міді методом гарячого штампування; встановлення впливу параметрів штампування на формування щільності структури і деяких властивостей виробів.

Результати експерименту і їх обговорення

У роботі досліджували процес гарячого штампування порошкових матеріалів антифрикційного призначення на основі порошоків дисперснозміцненої міді, отриманих за методикою, наведеною в праці [5]. Для можливості порівняння методів компактування як вихідну шихту використовували суміш порошоків дисперснозміцненої міді (ДЗМ) (86%), заліза (10%) і графіту (4%) марки ГТ-1 (ГОСТ 4596–75), подібної за складом до такої, що використовувалась у [6] для дослідження процесу її компактування методом пресування з подальшим спіканням. Використаний порошок заліза був отриманий на Казенному заводі порошкової металургії, м. Бровари.

Для дослідження процесу компактування зразки в роботі отримували таким чином. Вихідні порошки змішували в Y-подібному змішувачі протягом 3 год. З отриманої шихти готували зразки пресуванням на гідравлічному пресі за тиску пресування 400–500 МПа. Отримані зразки нагрівали в муфельній печі у середовищі водню і потім без охолодження ущільнювали штамповкою на дугостаторному пресі ФБ–1730. При цьому досліджувався вплив температури та часу нагрівання заготовок і енергії штампування на ступінь ущільнення матеріалів і деякі їх властивості. Температура нагрівання зразків перед

штамповкою становила 850, 900, 950 і 1000 °С; час нагрівання за кожної температури – 5, 25 і 30 хв; питома енергія штампування, за інших рівних умов, – 90, 150, 200 і 250 Н·м/см³.

Результати дослідження впливу температури нагріву вихідних заготовок, часу витримки під час нагрівання та питомої енергії штампування на щільність отримуваних матеріалів наведено на рис. 1–3.

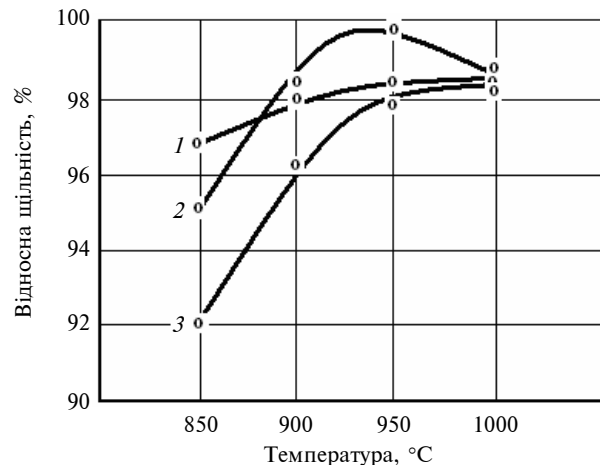


Рис. 1. Залежність щільності зразків з матеріалу на основі ДЗМ від температури їх нагрівання перед штампуванням за різного часу витримки (хв): 1 – 5; 2 – 15; 3 – 30 (енергія штампування 150 Н·м/см³)

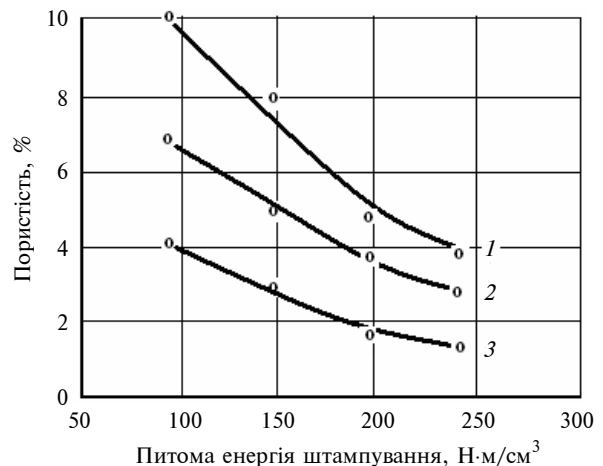


Рис. 2. Залежність пористості зразків з матеріалу на основі ДЗМ від питомої енергії їх штампування для різного часу нагріву (хв): 1 – 5; 2 – 15; 3 – 30 (температура нагріву перед штампуванням 850 °С)

З наведених даних видно, що щільності збільшуються зі зростанням температури нагріву. Виняток становить штампування за часу нагріву перед штамповкою 15 хв і температур нагріву 900 та 950 °С. За цих умов отримання зразки мають найбільшу щільність. Вплив часу

витримки під час нагрівання зразків перед штампуванням не однозначний: найбільшу щільність мають зразки, які нагрівали протягом 15 хв. Практично в усіх випадках збільшення енергії штампування сприяє отриманню зразків з більшою щільністю. При цьому в інтервалі збільшення енергії від 100 до 150 Н·м/см³ супроводжується інтенсивним збільшенням щільності, яке істотно уповільнюється зі збільшенням енергії від 200 до 250 Н·м/см³.

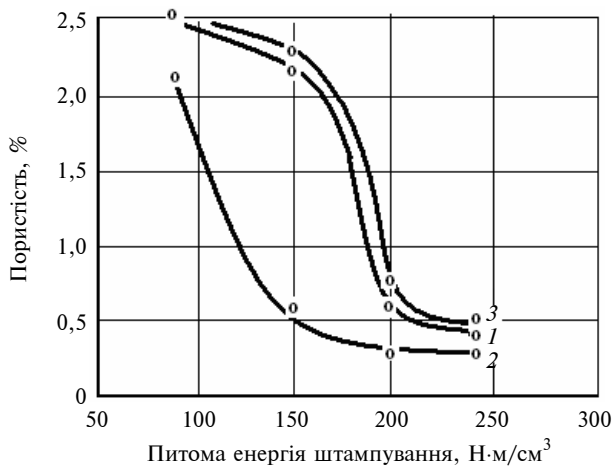


Рис. 3. Залежність пористості зразків з матеріалу на основі ДЗМ від питомої енергії штампування для різного часу нагріву (хв): 1 – 5, 2 – 15, 3 – 30 (температура нагріву перед штампуванням 950 °C)

Отримані дані можна пояснити так. Як відомо [10], процес ущільнення (спікання) порошкових виробів під час гарячого пресування (штамповки) відбувається за рахунок роботи лапласівських сил та зусиль, прикладених зовні. Ця робота витрачається на деформацію матеріалу (роботу дисипативних сил) під час його ущільнення. При цьому баланс робіт має вигляд [10]

$$\xi \cdot \left(\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{d\tau} \right)^2 = -\frac{\sigma}{V} \cdot \frac{dS}{d\tau} - \frac{P}{V} \cdot \frac{dV}{d\tau}, \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт макроскопічної в'язкості, який залежить від вихідної пористості пресовки:

$$\xi = 4 \cdot \eta \cdot \frac{(1-f) \cdot (1-2 \cdot f)}{f \cdot (3-f)}, \quad (2)$$

де η – перший коефіцієнт в'язкості, або в'язкість зсуву компактного матеріалу; f – пористість пресовки; V – об'єм вихідної пресовки; S – площа поверхні пор; P – зовнішнє зусилля; τ – час спікання (час прикладання зовнішнього зусилля).

Розв'язок цього рівняння дає можливість встановити щільність (пористість) виробів після гарячого штампування (пресування) залежно від умов їх отримання згідно з рівнянням

$$-\frac{1+2 \cdot a}{3+a} \cdot \ln \frac{f+a}{f_0+a} - \frac{5}{3+a} \cdot \ln \frac{3-f}{3-f_0} = \frac{P}{4} \cdot \int_0^\tau \frac{d\tau}{\eta}, \quad (3)$$

де $a = 2 \cdot \sigma / P \cdot d_1$ (d_1 – середній діаметр вихідних частинок порошоків пресовки); f_0 – вихідна пористість пресовки.

З урахуванням того, що в'язкість кристалічних тіл змінюється з температурою і часом, вираз (3) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \frac{1+2 \cdot a}{3+a} \cdot \ln \frac{f_0+a}{f+a} - \frac{5}{3+a} \cdot \ln \frac{3-f}{3-f_0} = \\ = \frac{P}{4 \cdot \eta_0 \cdot b} \cdot \ln(1+b \cdot \tau). \end{aligned} \quad (4)$$

У першому наближенні

$$b = \frac{l^2 - l_0^2}{l_0^2 \cdot \tau}, \quad (5)$$

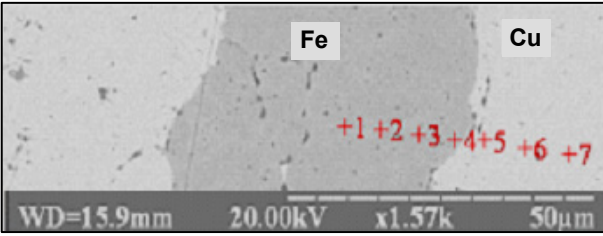
де l – середній розмір зерен за час спікання; l_0 – початковий розмір зерен.

Враховуючи викладене вище, можна зазначити таке. Під час нагрівання виробів перед спіканням також відбувається їх спікання зі зміною пористості. Збільшення часу спікання сприяє зменшенню пористості і, відповідно, їх в'язкості, яка збільшується зі зменшенням пористості згідно з рівнянням (2). З урахуванням того, що згідно з рівнянням (1) зі збільшенням в'язкості буде збільшуватись (за інших рівних умов) робота, необхідна для деформування матеріалу збільшення в'язкості за однієї і тієї ж енергії штампування (яка визначає величину зовнішніх зусиль), буде зменшуватись щільність матеріалу після пресування.

З іншого боку, зі збільшенням температури відбувається збільшення пластичності матеріалів [11] (зменшення в'язкості матеріалу частинок порошоків), що повинно сприяти ущільненню порошкових заготовок під час штампування і їх меншій пористості. Конкурування цих процесів, мабуть, і приводить до екстремальних значень щільності пресовок після штампування у випадку їх попереднього нагрівання за температур 900–950 °C протягом 15 хв (див. рис. 1). При цьому така залежність зберігається і за інших рівних умов для всіх енер-

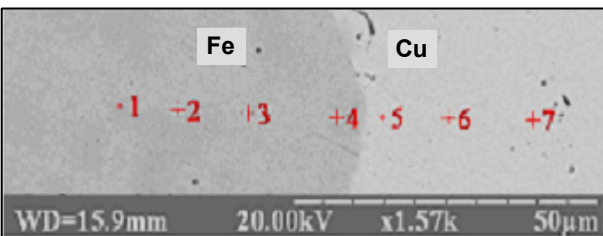
Таблиця 1. Структура та розподілення елементів на межі контакту Fe–Cu після нагрівання за температури 950 °C протягом 5 хв

Точка	Вміст, %		
	Fe	Cu	Cr
1	99,21	0,79	–
2	98,15	1,85	–
3	98,66	1,64	–
4	97,96	2,04	–
5	0,41	99,51	0,08
6	0,22	99,67	0,11
7	0,20	99,70	0,10



Таблиця 2. Структура та розподілення елементів на межі контакту Fe–Cu після нагрівання за температури 950 °C протягом 30 хв

Точка	Вміст, %		
	Fe	Cu	Cr
1	98,14	1,86	–
2	97,10	2,90	–
3	96,24	3,75	–
4	97,92	2,08	–
5	0,37	99,54	0,09
6	0,29	99,59	0,12
7	0,25	99,65	0,10



гій штампування, які застосовували в роботі (див. рис. 1, 2).

Зменшення здатності до ущільнення під час гарячого штампування може також бути зумовлене взаємодією між залізом та міддю в матеріалі під час нагрівання перед штамповкою. Як відомо [12], залізо та мідь взаємодіють між собою з утворенням твердих розчинів, які мають вищу твердість, ніж чисті мідь та залізо. Останнє підтверджується результатами проведених нами досліджень мікроструктури матеріалів, отриманих за різних умов.

Як видно з табл. 1 і 2, у яких показані структура та розподіл елементів на межі контакту заліза та міді, збільшення часу витримки нагрівання зразків перед штамповкою сприяє більшому взаємному проникненню заліза та міді з утворенням, як відзначалося вище, твердих розчинів.

У роботі також досліджувались твердість, границя міцності на згин й електроопір отриманих матеріалів. Результати цих досліджень наведені на рис. 4–6.

Дослідження твердості отриманих за різних умов матеріалів показало (рис. 4), що її значення в основному корелюють зі значеннями щільності цих матеріалів (див. рис. 1). Твердість

збільшується зі збільшенням щільності, що узгоджується з існуючими уявленнями про твердість порошкових матеріалів [13]. Однак у випадку отримання матеріалів штампуванням заготовки за енергії більше 150 Н·м/см³, попередньо нагрітих за температури 950 °C з витримкою 30 хв, незважаючи на відносно нижчу щільність зразків (див. рис. 1), їх твердість вища і наближується до твердості зразків, нагрітих перед штамповкою протягом 15 хв. Це можна пояснити тим, як відомо, твердість порошкових матеріалів визначається твердістю складових матеріалу та величиною пористості. При цьому зі збільшен-

ням твердості складових твердість матеріалу збільшується, а зі збільшенням пористості – зменшується. У нашому випадку, мабуть, має місце конкурування цих процесів. Як було зазначено вище, у процесі нагрівання матеріалу перед штампуванням відбувається взаємодія міді та заліза з утворенням твердих розчинів, які мають вищу твердість, ніж вихідні компо-

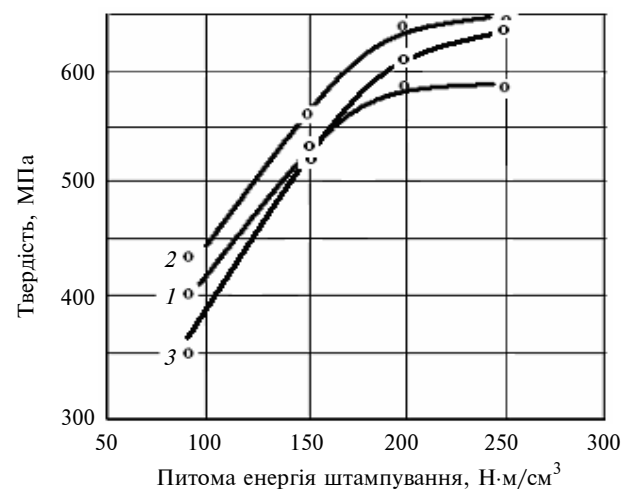


Рис. 4. Залежність твердості від питомої енергії штампування і часу нагрівання перед штампуванням за температури 950 °C (хв): 1 – 5; 2 – 15; 3 – 30

ненти. Останнє і може бути причиною відхилення від кореляції між значеннями пористості та твердості наших матеріалів. Це деякою мірою підтверджується дослідженням міцності на згин.

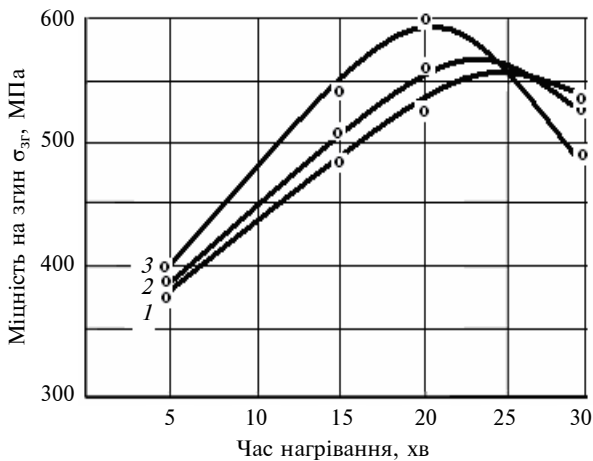


Рис. 5. Залежність міцності на згин від часу нагрівання заготовок перед гарячим штампуванням за різних температур (°С): 1 – 850; 2 – 900; 3 – 950 (питома енергія штампування 200 Н·м/см³)

Міцність на згин визначали на отриманих штампуванням зразках, нагрітих за різних температур, для різних часів ізотермічної витримки (рис. 5). Як видно з наведених даних в основному має місце кореляція між значенням міцності на згин та пористістю і твердістю матеріалів. Однак для зразків, нагрітих перед штампуванням протягом 30 хв, за всіх досліджуваних температур має місце зниження міцності на згин. Це також може підтверджувати

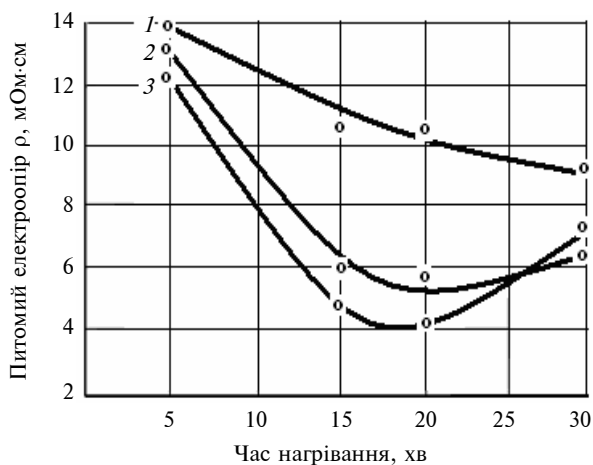


Рис. 6. Залежність питомого електроопору від часу нагрівання заготовок перед гарячим штампуванням за різних температур (°С): 1 – 850; 2 – 900; 3 – 950 (питома енергія штампування 200 Н·м/см³)

наші передбачення, що зі збільшенням температури та витримки нагрівання збільшується вірогідність утворення твердіших і, як наслідок, більш крихких твердих розчинів Fe–Cu, що зумовлюють зменшення міцності на згин матеріалу в цілому.

У роботі також проводились дослідження електропровідності отриманих матеріалів, яка має важливе значення у випадку використання їх як струмознімачів рухомого транспорту. Досліджувався питомий електроопір матеріалів, які отримані за умов надання їм максимальної щільності та характеристик міцності. Встановлено залежність електроопору від температури та часу нагрівання заготовок перед штампуванням. Питома енергія штампування становила 200 Н·м/см³. Отримані результати наведені на рис. 6.

Як видно з наведених результатів, матеріал, отриманий штампуванням із попереднім нагрівом за всіх температур, які досліджувались у роботі, протягом 5 хв має відносно високий електроопір. Зі збільшенням часу попереднього нагрівання електроопір знижується для зразків, нагрітих за температури 850 °С. Для зразків, нагрітих за температур 900 і 950 °С, має місце його екстремальна залежність від часу нагрівання. Мінімальні значення електроопору спостерігаються для матеріалів, нагрітих протягом 15–20 хв. Ця залежність електроопору матеріалів від вказаних умов їх отримання може бути пояснена таким чином. Як відомо [14], на величину провідності порошкових матеріалів, за інших рівних умов, впливають пористість і стан кристалічної ґратки матеріалу. Тому збільшення електропровідності матеріалу зі збільшенням часу ізотермічної витримки під час нагрівання його перед штампуванням може бути зумовлене зменшенням пористості за рахунок спікання під час нагрівання. Великі значення електроопору зразків, нагрітих перед штампуванням протягом 5 хв, пояснюються відносно високою пористістю зразків. У цьому випадку на високий електроопір може впливати наявність на поверхні частинок порошку дисперснозміцненої міді оксидів з високим електроопором, які не встигають відновитись. Можлива наявність оксидів підтверджується даними роботи [5], у якій отримували такий порошок методом механічного диспергування розплаву міді, легovanого хромистим чавуном. Зі збільшенням часу ізотермічної витримки під час нагрівання вихідних зразків у відновному середовищі оксиди відновлюються. Це, поряд зі зменшенням

пористості матеріалу, сприяє зменшенню електроопору. Збільшення електроопору матеріалів, отриманих штамповкою вихідних зразків, попередньо нагрітих за температур 900 і 950 °С з часом ізотермічної витримки більше 20 хв, може бути зумовлено, як було зазначено вище, взаємодією заліза з міддю з утворенням твердого розчину, який має вищі значення електроопору, ніж мідь та залізо окремо взяті. Також причиною збільшення електроопору може бути, як було встановлено в роботі [6], виникнення дифузійної пористості під час взаємодії заліза та міді за рахунок проявлення ефекту Френкеля під час проходження гетеродифузійних процесів.

Висновки

Унаслідок аналізу літературних даних встановлено, що перспективними матеріалами для виготовлення порошкових матеріалів антифрикційного призначення для роботи як струмознімачів рухомого транспорту є композиції на основі порошків дисперснозміцненої міді, зносостійкість яких може бути значно більшою порівняно з існуючими. Також встановлено, що використання методу гарячого штампування дасть змогу отримати вироби із матеріалів на основі дисперснозміцненої міді з максимальною щільністю і, як наслідок, з більш високими експлуатаційними характеристиками.

Список літератури

1. *Порошковая* металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, П.К. Дружинин и др.; под. ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 790 с.
2. *Федорченко И.М., Пугина Л.И.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. думка, 1980. – 404 с.
3. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Т. 1. – К.: Наук. думка, 2002. – 569 с.
4. *Берент В.Я.* Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
5. *Одержання порошків дисперсно зміцненої міді / А.М. Степанчук, О.С. Богатов, М.Б. Шевчук, Н.Ф. Пашковець // Наукові нотатки ЛДТУ. – 2010. – Вип. 29. – С. 188–195.*
6. *Степанчук А.М., Богатов О.С., Грабійчук М.О.* Закономірності компактування порошкових антифрикційних матеріалів на основі дисперснозміцненої міді // Наукові вісті НТУУ"КПІ". – 2011. – № 5. – С. 95–100.
7. *Дорофеев В.Ю., Дорофеев Ю.Г.* Горячая штамповка порошковых заготовок: ее сегодня и завтра // Порошковая металлургия. – 2013. – № 7-8. – С. 27–36.
8. *Промышленная* технология горячего прессования порошковых изделий / Ю.Г. Дорофеев, Б.Г. Гасанов, В.Ю. Дорофеев и др. – М.: Металлургия, 1990. – 206 с.
9. *Баглюк Г.А., Михайлов О.В.* Численный анализ процесса горячей штамповки пористых заготовок в закрытом штампе с конусообразным компенсатором // Порошковая металлургия. – 2012. – № 3-4. – С. 29–37.
10. *Ковальченко М.С.* Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. – К.: Наук. думка, 1980. – 240 с.

Уперше були отримані нові дані про процеси ущільнення матеріалів на основі дисперснозміцненої міді методом гарячого штампування. Встановлена залежність властивостей матеріалів (щільності, твердості, межі міцності на згин, питомого електроопору) від умов їх отримання – енергії штампування, температури та часу нагрівання вихідних заготовок перед штампуванням.

З використанням сучасних уявлень про формування властивостей порошкових матеріалів при їх компактуванні запропоновано механізм ущільнення досліджуваних матеріалів на різних стадіях гарячого штампування. Останнє дає можливість отримувати їх із наперед заданими властивостями.

Встановлено, що оптимальними умовами отримання матеріалів з максимальною щільністю, твердістю, межею міцності на згин та мінімальним питомим електроопором є нагрівання вихідних заготовок за температур 900–950 °С протягом 15–20 хв і подальше їх штампування за питомої енергії 200–250 Н·м/см³.

Надалі з метою визначення оптимальних значень властивостей матеріалів як струмознімачів рухомого електротранспорту необхідне вивчення їх триботехнічних характеристик та проведення натурних випробувань.

11. Павлов В.А., Ляшенко А.П. Исследование влияния течения порошкового металла в процессе горячей штамповки на плотность и структуру горячештампованного порошкового титана // Порошковые конструкционные, антифрикционные и фрикционные материалы. – К.: ИПМ АН УССР, 1983. – С. 77–83.
12. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 760 с.
13. Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А. Технология порошковой металлургии. – К.: Вища школа, 1989. – 415 с.
14. Косторнов А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Т. 2. – К.: Наук. думка, 2002. – 550 с.

References

1. V.N. Antsiferov *et al.*, *Powder Metallurgy and Sprayed Coatings*. Moscow, USSR: Metallurgy, 1987, 790 p. (in Russian).
2. I.M. Fedorchenko and L.I. Pugin, *Composite Sintered Antifriction Materials*. Kyiv, USSR: Naukova Dumka, 1980, 404 p. (in Russian).
3. A.G. Kostornov, *Materials Science of Dispersed and Porous Metals and Alloys*, vol. 1. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2002, 569 p. (in Russian).
4. V.A. Berent, *Materials and Properties of the Electrical Contacts in Devices of Railway Transport*. Moscow, Russia: Intekst, 2005, 408 p. (in Russian).
5. A.M. Stepanchuk *et al.*, “Production of dispersed-reinforced copper powders”, *Naukovi Notatki LTDU*, vol. 29, pp. 188–195, 2010 (in Ukrainian).
6. A.M. Stepanchuk *et al.*, “Principles of compaction powder antifrictional material based on dispersion-hardened copper”, *Naukovi Visty NTTU “KPI”*, no. 5, pp. 53–59, 2011 (in Ukrainian).
7. V.Yu. Dorofeev and Yu. G. Dorofeev, “Hot stamping of powder blanks: it today and tomorrow”, *Poroshkovaja Metallurgija*, no. 7-8, pp. 27–36, 2013 (in Russian).
8. Yu.G. Dorofeev *et al.*, *Industrial Technology of Hot-Pressed Powder Products*. Moscow, USSR: Metallurgy, 1990, 206 p. (in Russian).
9. G.A. Baglyuk and O.V. Mikhailov, “Numerical analysis of hot stamping of porous workpieces in closed dies with conical compensator”, *Poroshkovaja Metallurgija*, no. 3-4, pp. 29–37, 2012 (in Russian).
10. M.S. Koval’chenko, *Theoretical Foundations of Hot Working Pressure of Porous Materials*. Kyiv, USSR: Naukova Dumka, 1980, 240 p. (in Russian).
11. V.A. Pavlov and A.P. Lyashenko, “Investigation of the effect of flow of the powder metal during hot stamping on the density and structure of hot stamping powder powder titanium”, *Powder Constructional, Antifrictional and Frictional Materials*. Kyiv, USSR: IPM Ukrainian Academy of Sci., 1983, pp. 77–83 (in Russian).
12. F.A. Shank, *Binary Alloy Structures*. Moscow, USSR: Metallurgy, 1973, 760 p. (in Russian).
13. A.M. Stepanchuk *et al.*, *Technology of Powder Metallurgy*. Kyiv, USSR: Vishcha Shkola, 1989, 415 p. (in Russian).
14. A.G. Kostornov, *Materials Science of Dispersed and Porous Metals and Alloys*, vol. 2. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2002, 550 p. (in Russian).

А.М. Степанчук, О.С. Богатов, Л.О. Бірюкович

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПАКТУВАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНОЗМІЦНЕНОЇ МІДІ

Проблематика. Створення теоретичних і технологічних засад отримання порошкових матеріалів антифрикційного призначення з використанням порошоків дисперснозміцненої міді є актуальною задачею, розв’язання якої потребує установлення залежностей властивостей кінцевого виробу від умов його одержання.

Мета досліджень. У роботі поставлено за мету вивчення процесів отримання виробів із порошкових матеріалів на основі дисперсної міді методом гарячого штампування для виготовлення з них струмозмичачів рухомого електротранспорту, а також встановлення впливу параметрів штампування на формування щільності структури та деяких властивостей виробів – твердості, границі міцності на згин і питомого електроопору.

Методика реалізації. Розроблено методику дослідження процесу компактування порошкових виробів методом гарячого штампування. Вивчення щільності, структури та властивостей проводилось із використанням сучасних методик і обладнання для визначення механічних характеристик, оптичної та електронної мікроскопії, комп’ютерних технологій.

Результати дослідження. Проведено дослідження процесів компактування матеріалів антифрикційного призначення на основі дисперснозміцненої міді. Встановлено залежність властивостей матеріалів від умов їх отримання – енергії штампування, температури та часу нагрівання вихідних заготовок перед штампуванням. Показано, що за певних умов штампування щільність матеріалів істотно зростає зі збільшенням енергії штампування до 200 Н·м/см³ і у подальшому змінюється неістотно. Відносна щільність матеріалу, нагрітого до температури 950 °С протягом 20–25 хв, найвища і становить 99-100 %. Подальше збільшення часу нагрівання призводить до зменшення щільності після штамповки. Значення твердості матеріалу корелюють зі значеннями щільності. Максимальні значення твердості становлять 550–600 МПа. Значення границі міцності на згин та питомого електроопору теж корелюють зі значеннями щільності матеріалу, але також є залежними від структури матеріалу. Максимальні значення границі міцності становлять 180–200 МПа, а мінімальні значення питомого електроопору – 3,8–4,0 мОм·см. Отримані результати

тати пояснені з використанням сучасних уявлень про формування властивостей порошкових матеріалів при їх компактуванні, що дає можливість отримувати їх із наперед заданими властивостями.

Висновки. Встановлено залежність властивостей матеріалів антифрикційного призначення для виготовлення з них струмомознімачів рухомого електротранспорту від умов їх виготовлення через компактування пористих заготовок гарячим штампуванням. Оптимальними умовами отримання матеріалів з максимальною щільністю, твердістю, границею міцності на згин та мінімальним питомим електроопором є нагрівання вихідних заготовок за температур 900–950 °С протягом 15–20 хв і подальше їх штампування за питомої енергії 200–250 Н·м/см³.

Ключові слова: дисперснозміцнена мідь; струмомознімачі; щільність; твердість; границя міцності на згин; питомий електроопір; нагрівання; штампування; структура.

А.Н. Степанчук, А.С. Богатов, Л.О. Бирюкович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

Проблематика. Создание теоретических и технологических основ получения порошковых материалов антифрикционного назначения с использованием порошков дисперсноупрочненной меди является актуальной задачей, решение которой требует установления зависимостей свойств конечного изделия от условий его получения.

Цель исследований. В работе поставлена цель изучения процессов получения изделий из порошковых материалов на основе дисперсноупрочненной меди методом горячей штамповки для изготовления из них токосъемников подвижного электро-транспорта, а также установления влияния параметров штамповки на формирование плотности, структуры и некоторых свойств изделий – твердости, предела прочности на изгиб и удельного электросопротивления.

Методика реализации. Разработана методика исследования процесса компактирования порошковых изделий методом горячей штамповки. Изучение плотности, структуры и свойств проводилось с использованием современных методик и оборудования для определения механических характеристик, оптической и электронной микроскопии, компьютерных технологий.

Результаты исследования. Проведены исследования процессов компактирования материалов антифрикционного назначения на основе дисперсноупрочненной меди. Установлена зависимость свойств материалов от условий их получения – энергии штамповки, температуры и времени нагрева исходных заготовок перед штамповкой. Показано, что плотность материалов существенно растет с увеличением энергии штамповки до 200 Н·м/см³ и в дальнейшем изменяется незначительно. Относительная плотность материала, нагретого до температуры 950 °С в течение 20–25 мин, самая высокая и составляет 99–100 %. Дальнейшее увеличение времени нагрева приводит к уменьшению плотности после штамповки. Значения твердости материала коррелируют со значениями плотности. Максимальные значения твердости составляют 550–600 МПа. Значения предела прочности на изгиб и удельного электросопротивления также коррелируют со значениями плотности материала, но при этом зависят от структуры материала. Максимальные значения предела прочности составляют 180–200 МПа, а минимальные значения удельного электросопротивления – 3,8–4,0 мОм·см. Полученные результаты объяснены с использованием современных представлений о формировании свойств порошковых материалов при их компактировании, что дает возможность получать их с заранее заданными свойствами.

Выводы. Установлена зависимость свойств материалов антифрикционного назначения для изготовления из них токосъемников подвижного электро-транспорта от условий их изготовления компактированием пористых заготовок горячей штамповкой. Оптимальными условиями получения материалов с максимальной плотностью, твердостью, пределом прочности на изгиб и минимальным удельным электросопротивлением являются нагрев исходных заготовок до температур 900–950 °С в течение 15–20 мин и следующая их штамповка при удельной энергии 200–250 Н·м /см³.

Ключевые слова: дисперсноупрочненная медь; токосъемники; плотность; твердость; предел прочности на изгиб; удельное электросопротивление; нагрев; штамповка; структура.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
15 жовтня 2015 року