

УДК 621.793; 669.1

А.М. Степанчук, О.С. Богатов, М.О. Грабійчук

ЗАКОНОМІРНОСТІ КОМПАКТУВАННЯ ПОРОШКОВИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНОЗМІЦНЕНОЇ МІДІ

The paper studies the influence of antifriction materials based on dispersion strengthened copper powders with alloying additions of graphite and iron on the process of pressing and subsequent sintering. We examine the influence of pressure, temperature and sintering time on structure and sealing material in order to optimize them. We propose the equation for an analytical description of materials compaction. We show that the plastic deformation of the components of the original charge lie in the base of the compaction process. We study the regularities of the pressed sintering samples from the investigated materials. We demonstrate that the processes of densification during sintering is affected by temperature, sintering time and the processes of alloy accompanied by manifestation of the Frenkel effects and pressure of recrystallization. We use standard methods for determining the characteristics of porous bodies. Pressing was performed at the hydraulic press with the automatic recording of pressure. Pressing was performed in the hydraulic press with the automatic registration of its force, sintering was made in the muffle furnace of the batch operation in hydrogen atmosphere with a dew point – 20 °C. We study the structures of the sintered samples using an optical microscope (NEOPHOT) and the electron microscope (PEM 106). Finally, we determine the optimum compaction pressure of 500–600 MPa and sintering conditions (temperature – 900 °C, time – 60 minutes), which provide specific products properties.

Вступ

Нині широкого розповсюдження набули порошкові матеріали [1]. Однією з галузей застосування таких матеріалів є виготовлення з них виробів антифрикційного призначення [2, 3], які мають ряд істотних переваг перед традиційними. Використовують порошкові антифрикційні матеріали і при виробництві контактів ковзання, в т.ч. струмознімачів рухомого транспорту [4]. Останні працюють у складних умовах впливу зовнішніх атмосферних явищ, навантажень. Такі матеріали повинні мати поряд з високою електропровідністю добру зносостійкість, малий коефіцієнт тертя та низку інших спеціальних властивостей. Таким вимогам деякою мірою відповідають матеріали на основі графіту, міді, заліза або їх сумішей з легувальними добавками, які надають матеріалам спеціальні властивості залежно від умов експлуатації [1–4]. Враховуючи широке розповсюдження антифрикційних матеріалів, які працюють в умовах ковзання, ускладнення умов їх експлуатації, пов'язаних зі збільшенням швидкостей ковзання, вимагає вдосконалення наявних матеріалів або розроблення нових. Це вирішується через оптимізацію складу таких матеріалів, покращення необхідних властивостей їхніх складових частин або розробленням чи вдосконаленням технології виготовлення виробів з них. На сьогодні вирішення цих проблем є доволі актуальним.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу складу антифрикційного матеріалу та властивостей його складових частин на процеси їх пресування і спікання. При цьому буде вивчено вплив тиску пресування та температури і часу спікання на формування структури та щільності з метою їх оптимізації.

Результати експерименту та їх обговорення

Перспективними для створення антифрикційних порошкових виробів електротехнічного призначення є матеріали на основі міді. При цьому експлуатаційні властивості таких виробів можуть бути покращені за рахунок дисперсного зміцнення матеріалу вихідних порошків [5–7].

У роботі досліджували процеси пресування порошкових матеріалів антифрикційного призначення на основі порошків міді. Розглядали дві шихти із таким вмістом порошку: 86 % міді, 10 % заліза та 4 % графіту. У шихті 1 як основу використовували порошок міді, отриманий механічним диспергуванням її розплаву [8]; у шихті 2 – порошок міді, дисперснозміцнений хромистим чавуном [7].

Для приготування вихідної шихти антифрикційного матеріалу використовували порошок заліза, отриманий розпилюванням розплавів за методом Броварського Казенного заводу порошкової металургії. Розмір частинок порошку становив 100 мкм. До складу вихідних шихт та

кож ввели порошок графіту марки ГТ-1 згідно з ГОСТ 4596-75.

Вихідну шихту отримали змішуванням вихідних компонентів з використанням Y -подібного змішувача протягом 2 год.

Потім досліджували вплив складу вихідної шихти на процес її ущільнення. Пресування проводили при тисках 100, 200, 300, 400, 500, 600 МПа. Після цього визначали щільність, відносну щільність, пористість і відносний об'єм зразків.

За отриманими результатами побудовано графічні залежності відносної щільності від тиску пресування, які наведено на рис. 1.

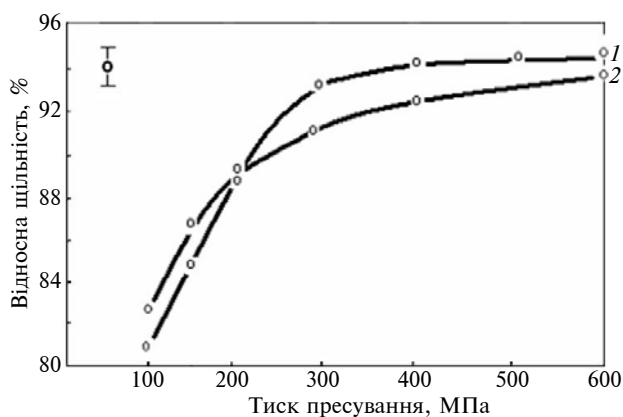


Рис. 1. Залежність відносної щільності зразків із шихт різного складу від тиску пресування: 1 – шихта 1; 2 – шихта 2

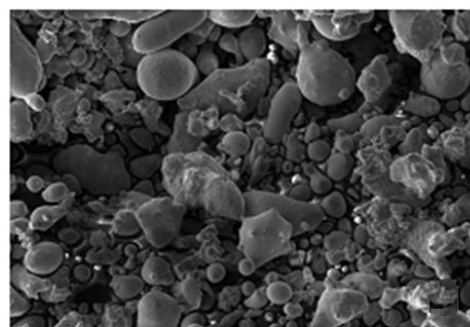
Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що ущільнюваність шихт залежить від їх складу. Вищу ущільнюваність має шихта на основі порошку чистої міді при тиску пресування, меншому за 100–200 МПа; при вищому за 200 МПа більша ущільнюваність у шихти на основі міді, дисперснозміцненої хромистим чавуном. При цьому відносна щільність 92–93 % досягається за тиску пресування 400–500 МПа і при подальшому його зростанні практично не змінюється. Під час пресування шихти на основі чистої міді максимальні значення відносної щільності отримано при тиску пресування 500–600 МПа.

Слід зазначити, що більш висока ущільнюваність шихти на основі порошку чистої міді за тиску пресування близько 100–150 МПа відбувається тоді, коли ущільнення порошкової шихти йде в основному за рахунок структурної деформації [9, 10].

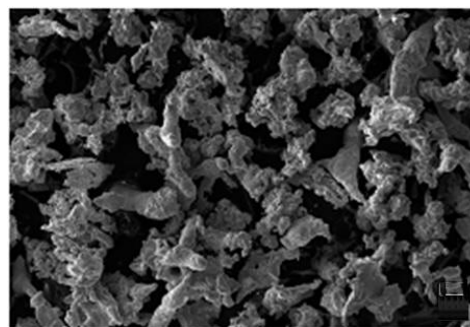
Отримані результати можна пояснити тим, що, як відомо [9, 10], процес ущільнення від-

бувається у кілька стадій. При цьому для пластичних матеріалів – за рахунок структурної та пластичної деформації частинок порошоків. На ці процеси впливає багато факторів, і серед них фізичні та технологічні властивості вихідних порошоків [1, 9–10]. Звичайно, при інших однакових умовах краще ущільнюються порошки з пластичних матеріалів. З цієї точки зору має місце деяка невідповідність результатів, отриманих у роботі при ущільненні матеріалів на основі чистої міді і міді, дисперснозміцненої хромистим чавуном, яка є твердішою. У нашому випадку шихта на основі останнього порошку за тиску пресування 100–200 МПа ущільнюється краще.

Але також відомо, що на процес ущільнення, особливо на стадії структурної деформації, впливає форма частинок порошку. Тому дані, отримані в нашому дослідженні, можуть пояснюватися саме впливом форми частинок порошку, яка різна для порошку чистої та дисперснозміцненої міді (рис. 2). Як видно з рис. 2, крива 1, порошки чистої міді мають більш гладку поверхню, а дисперснозміцненої – більш розвинену (рис. 2, крива 2). При ущільненні порошки правильнішої форми утворю-



а



б

Рис. 2. Топографія поверхні порошоків міді, отриманих механічним диспергуванням розплавів ($\times 250$): а – порошок з чистої міді; б – порошок дисперснозміцненої хромистим чавуном міді

ють пори більшого діаметра, для заповнення яких необхідний більш високий ступінь деформації. Тому за інших однакових умов матеріали на основі чистої міді ущільнюються дещо менше порівняно з матеріалами на основі міді, дисперснозміцненої хромистим чавуном. Про вплив форми частинок також свідчить менший ступінь ущільнення останніх при малому тиску пресування (див. рис. 1), коли ущільнення порошкових матеріалів відбувається в основному за рахунок структурної деформації, в основі якої лежить переміщення частинок одна відносно одної. Тому розвинена поверхня частинок буде збільшувати силу тертя між ними і, як наслідок, погіршувати ущільнюваність, що і спостерігається у нашому випадку.

Визначення залежності щільності пресовки від тиску пресування має практичне значення. Знаючи її, можна розрахувати тиск, необхідний для одержання заданої щільності та інших властивостей пресовки. Крім того, оптимальний тиск потрібно знати при розрахунку і конструюванні прес-форм для пресування конкретного виробу та для вибору відповідного пресу. Тому було проведено обробку експериментальних даних з метою встановлення оптимального аналітичного опису процесу ущільнення досліджуваних матеріалів.

Аналіз рівнянь пресування виявив, що для аналітичного опису процесів пресування досліджуваних порошкових матеріалів придатні рівняння М.Ю. Бальшина, М.Ф. Куніна та Б.Д. Юрченка, Г.М. Ждановича [9, 10]. Це зумовлено тим, що ущільнювались матеріали, які є переважно пластичними. Враховуючи це, для випадку пресування наших матеріалів можна використати найпростіше перше рівняння М.Ю. Бальшина [9], яке має такий вигляд:

$$\lg P = -L(\beta - 1) + C,$$

де β – відносний об'єм; L і C – сталі.

Щоб застосувати його при описі процесу ущільнення наших матеріалів необхідно визначити сталі рівняння L та C ($\lg P_{\max}$). Для цього використали графічний метод [9].

За отриманими даними побудували графічну залежність відносної щільності від тиску пресування і порівняли її з експериментальними (рис. 3). У зв'язку з тим, що теоретичні та практичні залежності лежать у межах довірчого інтервалу, робимо висновок, що отримане рівняння може бути використане для випадку пресування порошкових шихт, які містять порошки чистої міді та дисперснозміцненої хро-

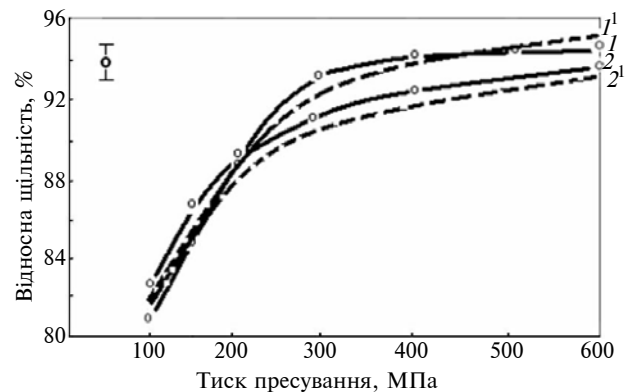


Рис. 3. Експериментальні (1, 2) та теоретичні (1¹, 2¹) залежності відносної щільності зразків із шихт різного складу від тиску пресування: 1 – шихта 1; 2 – шихта 2

мистим чавуном міді в межах тиску пресування, більшого за 150 МПа.

З метою оптимізації процесів компактування виробів антифрикційного призначення для струмознімачів рухомого транспорту, проводили дослідження процесів спікання пресовок з матеріалів, склад яких вказано вище. При цьому вивчався вплив температури та часу спікання на усадку при спіканні та щільність спечених виробів. Вихідні пресовки готували пресуванням вихідної шихти за тиску 500 МПа, при якому, як видно з рис. 1, досягається найбільш висока їх щільність.

Спікання зразків проводили в муфельній печі в середовищі водню при температурах 850; 950; 1000; 1050 °С та витримках 30, 45, 60 та 90 хв. Після спікання визначали щільність зразків та їх усадку. Отримані результати наведено на рис. 4–7.

Аналіз отриманих результатів засвідчує, що щільність зразків із шихти на основі чистої міді у випадку її спікання протягом 30 хв збільшується зі зростанням температури спікання (рис. 4). Така ж залежність зберігається і в разі спікання протягом 60 і 90 хв (рис. 4, криві 1–3). При спіканні за температури 1050 °С має місце складна залежність (рис. 5, крива 4). Щільність зразків зі збільшенням витримки до 60 хв зменшується, а потім знову зростає при збільшенні часу спікання.

При спіканні зразків із шихти, яка вміщує дисперснозміцнену хромистим чавуном мідь, спостерігається практично така ж сама залежність щільності від часу та температури спікання, за винятком спікання при температурі 1050 °С. У цьому випадку вона найменша у зраз-

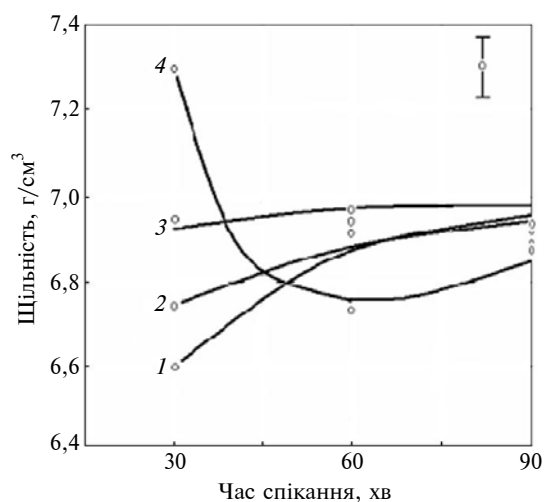


Рис. 4. Залежність щільності пресовок із шихти 1 від часу спікання: 1 – 850 °С; 2 – 950 °С; 3 – 1000 °С; 4 – 1050 °С

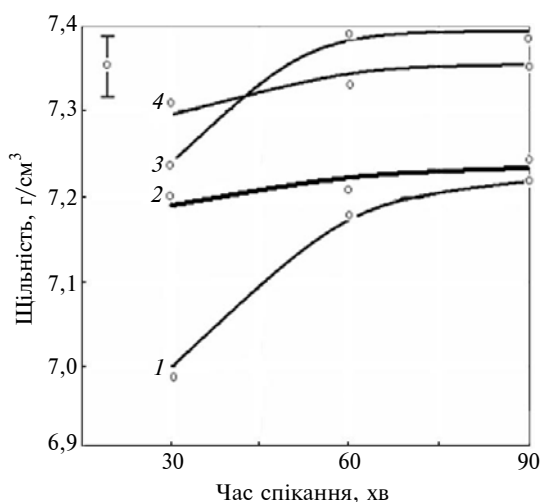


Рис. 5. Залежність щільності пресовок із шихти 2 від часу спікання: 1 – 1050 °С; 2 – 850 °С; 3 – 950 °С; 4 – 1000 °С

ків, спечених протягом 30 хв, і зростає зі збільшенням часу витримки. Але щільність залишається найменшою порівняно з випадками спікання при більш низьких температурах.

Якщо порівнювати абсолютні значення щільності, то слід зазначити, що вони більші для зразків із шихт на основі дисперснозміцненої міді.

Аналіз результатів дослідження процесів спікання, наведених на рис. 4–7, засвідчив, що вони узгоджуються із сучасними уявленнями про процеси, що відбуваються при спіканні порошкових матеріалів.

Як відомо [1, 11–13], на процеси спікання (зміну щільності пресовок, усадку при спікан-

ні, зміну їхніх властивостей) при інших однакових умовах в основному впливає температура спікання та час ізотермічної витримки. Як правило, зростання температури спікання та часу ізотермічної витримки сприяє збільшенню усадки виробів, зростанню їх щільності та покращенню механічних властивостей.

Отримані нами результати не завжди узгоджуються з цими уявленнями. Це може бути зумовлено тим, що на процеси спікання досліджуваних матеріалів, які є багатокомпонентними, впливають супутні процеси. До них слід віднести ефекти Френкеля [13], проявлення тиску кристалізації, наслідком яких є зростання розмірів виробів при їх спіканні, а також вплив поліморфних перетворень, які супроводжуються зміною дифузійної активності атомів.

Враховуючи останнє, результати, отримані при спіканні зразків з матеріалу на основі чистої міді (див. рис. 4) можна пояснити тим, що зростання щільності зразків зі збільшенням температури спікання при ізотермічній витримці 30 хв не суперечить загальним уявленням впливу температури на величину щільності. Але збільшення часу спікання призводить до аномального зменшення щільності зразків, спечених за температури 1050 °С протягом 60 хв. Надалі при збільшенні ізотермічної витримки щільність дещо зростає, але залишається меншою за щільність зразків, спечених за нижчих температур (рис. 4, крива 4). Такий характер залежностей щільності від температури та часу ізотермічної витримки ймовірно можна пояснити впливом на процеси спікання процесів гетеродифузії при взаємодії міді із залізом, яке входить до складу матеріалу. Як відомо [2, 11, 13], процес взаємодії міді із залізом проходить із проявленням ефекту Френкеля, який супроводжується утворенням додаткової пористості та твердого розчину Fe–Cu зі збільшенням об'єму матеріалу. Як наслідок, відбувається зменшення його щільності. Ці явища переважають у випадку спікання такого матеріалу протягом 30 хв. При збільшенні часу ізотермічної витримки відбувається гомогенізація матеріалу і на спікання переважний вплив мають процеси, які сприяють спіканню та усадці. Викладене підтверджується зміною усадки зразків залежно від температури та часу ізотермічної витримки при їх спіканні (рис. 6). Переважно спостерігається зростання розмірів зразків після спікання та складний характер зміни усадки залежно від часу в разі спікання при температурі 1050 °С (рис. 6, крива 3).

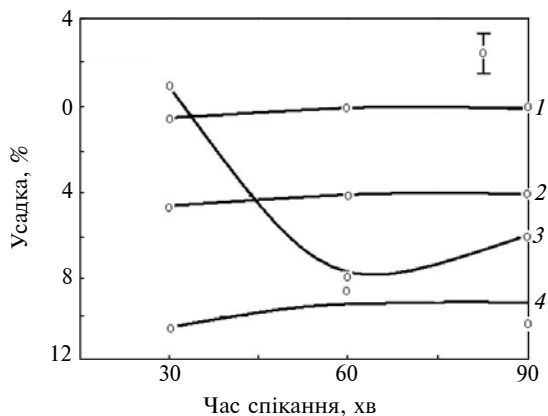


Рис. 6. Залежність усадки від часу спікання матеріалу на основі порошків чистої міді: 1 – 850 °С; 2 – 950 °С; 3 – 1050 °С; 4 – 1000 °С

ної ґратки, що, як відомо [14], може привести до активування процесів спікання.

Зміна щільності й усадки зразків при спіканні також узгоджується зі структурою матеріалів, яка свідчить про наявність сплавоутворення при спіканні та виникнення дифузійної пористості. Як видно з рис. 7, зразки, спечені за температури 850 °С, вміщують структурні складові частини (мідь, залізо, графіт) та пористість (рис. 7, а). У разі спікання за температури 1000 °С (рис. 7, б) пористість практично відсутня і в структурі матеріалу спостерігаються тільки його складові частини – мідь, залізо та графіт. У структурі зразків, спечених за температури 1050 °С, особливо чітко спостерігається дрібна пористість, яка може ідентифікуватись як дифузійна, зумовлена проявленням ефекту Френкеля.

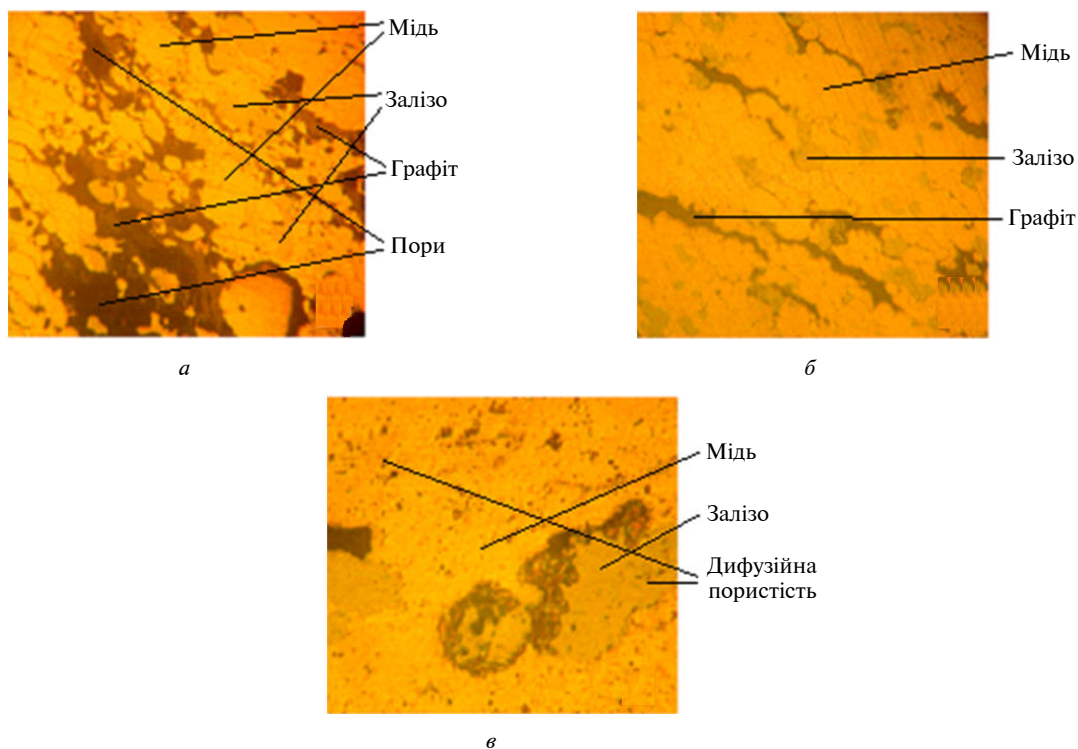


Рис. 7. Мікроструктура композиційного матеріалу на основі дисперснозміцненої міді, спеченого за різних умов: а – 850 °С, 30 хв ($\times 100$); б – 1000 °С, 30 хв ($\times 100$); в – 1050 °С, 60 хв ($\times 800$)

З цієї ж точки зору можна пояснити зміну щільності й усадки зразків залежно від температури та часу спікання з інших матеріалів, які досліджувались. Деякий інший характер залежностей і абсолютних значень зміни щільності й усадки зразків від температури та часу спікання можна пояснити впливом на процеси спікання дисперснозміцнювальної фази, наявність якої в порошку міді збільшує дефектність її кристаліч-

Висновки

У ході дослідження вивчено закономірності пресування композиційних порошкових сумішей з використанням як основи порошків чистої та дисперснозміцненої хромистим чавуном міді. Визначено оптимальний тиск пресування матеріалів, який становить 500–600 МПа.

Досліджено закономірності спікання спресованих зразків з досліджуваних матеріалів. Показано, що на процеси ущільнення при спіканні впливає температура та час спікання і процеси сплавоутворення, які супроводжуються проявленням ефектів Френкеля та тиску кристалізації.

У подальшому для оптимізації умов виготовлення виробів із композиційних матеріалів антифрикційного призначення необхідно провести дослідження їхніх експлуатаційних властивостей.

1. *Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учеб. для вузов / Под ред. А.Е. Митина.* – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
2. *Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А.* Технология порошковой металлургии. – К.: Выща шк., Глав. изд-во, 1989. – 416 с.
3. *Федорченко И.Н., Пугина Л.И.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. думка, 1980. – 404 с.
4. *Берент В.Я.* Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
5. *Патент України № 84546.* Спосіб одержання розпиленого дисперсно-зміщеного порошку на мідній основі / Богатов О.С., Кірієвський Б.Л., Сахненко О.В. – Опубл. 27.10.2008; Бюл. № 20.
6. *Кириевский Б.А., Трубаченко Л.Н.* Новые дисперсно-упрочненные бронзы и технология получения // Процессы литья. – 2004. – № 4. – С. 61–65.
7. *Степанчук А.М., Богатов О.С., Шевчук М.Б. та ін.* Отримання порошків дисперсно зміщеної міді // Наукові нотатки. – 2010. – Вип. 29. – С. 188–195.
8. *Найда Ю.И., Степанчук А.Н., Найда А.Ю.* Промышленное производство порошков сплавов меди методом ударного дробления струи расплава // Порошковая металлургия. – 2006. – № 1/2. – С. 112–117.
9. *Степанчук А.Н.* Закономерности прессования порошковых материалов. – К.: НМК ВО, 1992. – 176 с.
10. *Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др.* Феноменологические теории прессования порошков. – К.: Наук. думка, 1982. – 140 с.
11. *Скороход В.В., Солонин С.М.* Физико-металлургические основы спекания порошков. – М.: Металлургия, 1984. – 160 с.
12. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Т. 2. – К.: Наук. думка, 2003. – 550 с.
13. *Степанчук А.М., Мініцький А.В.* Основи отримання порошкових та композиційних матеріалів. Ч. II. Пресування, спікання, технологія. – К.: НТУУ “КПІ”, 2010. – 112 с.
14. *Кислый П.С., Кузенкова М.А.* Спекание тугоплавких соединений. – К.: Наук. думка, 1980. – 168 с.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
4 квітня 2011 року