

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 620.22

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСОЛІДАЦІЇ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ Cu–Pb–C

Канд. техн. наук В. О. Чишкала, доктори техн. наук С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький, асп. Б. О. Мазилін

RESEARCH OF FEATURES OF CONSOLIDATION OF ANTI-FRICTION MATERIALS BASED ON POWDER MIXTURE Cu–Pb–C

PhD (Tech.) V. O. Chyshkala, Dr. Sc. (Tech.) S. V. Lytovchenko, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate B. O. Mazilin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256456>

Анотація. У статті наведено результати досліджень різних методів отримання антифрикційного матеріалу «мідь–свинець–графіт» методами порошкової металургії. За допомогою гарячої вакуумної електроконсолідації порошків, що є ефективною для тугоплавких матеріалів, визначено умови для роздільного холодного пресування, а саме – формування виробу при 500 МПа і спікання при 900 °С, що більш продуктивно для металевих порошків. З переліку досліджених органічних рідин було обрано гас, який дав змогу отримати якісні вироби без тріщин з густиною 5,6–5,9 г/см³ при зусиллі навантаження близько 500 МПа. Спікання проводилось в інертному середовищі азоту, що дало змогу зменшити втрати свинцю до 2–5 % при температурах вище 700 °С. Твердість отриманих зразків становила 42–46 НВ за Брінеллем (135–150 МПа). Механічна обробка зразків різними різальними інструментами проводилась при різних швидкостях і показала гарну оброблюваність. Оброблені деталі при зберіганні не змінювали свої розміри. За допомогою розробленої технології можливо виготовляти композиційні матеріали з густиною 4,4–6,2 г/см³ і твердістю від 30–48 НВ за Брінеллем (99,9–159 МПа).

Ключові слова: антифрикційні матеріали, підшипник, порошкова металургія, пресування, свинець, спікання.

Abstract. The article represents the results of research of various methods of obtaining antifriction material "copper-lead-graphite" by methods of powder metallurgy. With the help of hot vacuum electroconsolidation of powders, which is effective for refractory materials, the conditions for separate cold pressing are determined, namely, product formation at 500 MPa and sintering at 900 °C, which is more productive for metal powders.

The initial formation of the samples was carried out in a collapsible steel mold on a hydraulic press with a force of up to 200 tons from a mixture of powders of copper, lead and graphite, which had dimensions of 60–200 μm. Sintering was performed in a vacuum oven at temperatures of 700–900 °C for 20–30 minutes. To obtain a density of more than 5.6 g/cm³, it is necessary to significantly increase the pressure during the formation of powders. During the formation of the dry mixture, compression transverse cracks appear.

Liquefied kerosene was selected from the list of studied organic liquids, which allowed to obtain high-quality products without cracks with a density of 5.6–5.9 g/cm³ at a load force of about

500 MPa. Sintering was performed in an inert nitrogen environment, which reduced lead losses to 2–5 % at temperatures above 700 °C. Nitrogen was first supplied to the vacuum chamber to a pressure of 1 atmosphere, and after increasing the temperature in the chamber, the nitrogen pressure rose to 1.2 atm.

The hardness of the obtained samples was 42–46 HB according to Brinell (135–150 MPa). Machining of samples with different cutting tools was performed at different speeds and showed good machinability. Processed parts during storage have not changed their size. With the help of the developed technology it is possible to produce composite materials with a density of 4.4–6.2 g/cm³ and a Brinell hardness of 30–48 HB (99.9–159 MPa).

Keywords: *antifriction materials, bearing, powder metallurgy, pressing, lead, sintering.*

Вступ. Одним з найважливіших об'єктів порошкової металургії є антифрикційні матеріали. Необхідність забезпечення рухомих зчленувань машин та механізмів зносостійкими матеріалами для різних умов роботи привела до створення великої різноманітності матеріалів на основі заліза, міді та їх сплавів. Застосування спечених антифрикційних матеріалів дало змогу вирішити такі завдання, як економія кольорових металів, зниження вартості виготовлення, зменшення втрат металу при обробці, підвищення продуктивності праці, зменшення верстатного парку та ін. [1, 2].

Можливості методів отримання виробів порошкової металургії дали змогу створити складні композиційні матеріали, у яких введення тих чи інших добавок забезпечувало отримання чітко заданих властивостей [3, 4]. Якщо на початку минулого століття графіт був єдиною добавкою, що забезпечувала в матеріалі ефект сухого мастила, то останнім часом як такі присадки значного поширення набули сірка, сульфід, фториди, фторопласти. Створено матеріали, які здатні працювати при досить високих швидкостях (понад 5–10 м/с) і великих навантаженнях (більш ніж 10 МПа), під час підвищення температури (до 460 °C і вище), в умовах тертя без змащення, за наявності агресивних та інертних рідких і газових середовищ, у вакуумі, в умовах низьких температур (до мінус 260 °C) [5, 6].

Для отримання потрібних властивостей при виготовленні антифрикційних матеріалів розпочали активно використову-

вати різні методи термічної та хіміко-термічної обробки [7]. У промислових масштабах проходить виготовлення з антифрикційних матеріалів різних підшипників ковзання, торцевих ущільнень, розпірних втулок, підп'ятників, поршневих кілець тощо.

Спечені антифрикційні матеріали широко застосовуються в різних галузях техніки: в сільгоспмашинобудуванні, автомобільній промисловості, важкому, енергетичному і транспортному машинобудуванні, текстильній і харчовій промисловості, побутовій техніці, верстатобудуванні, авіаційній та космічній техніці, газотурбобудуванні, хімічному машинобудуванні та ін.

Великі потенційні можливості порошкової металургії дають змогу у міру розвитку техніки підвищувати рівень вимог до властивостей матеріалів за значеннями допустимих навантажень, швидкостей ковзання, термінів служби та інших параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з найбільш ефективних антифрикційних матеріалів є композит «мідь–свинець–графіт», особливо з великим (8–15 %) вмістом свинцю і графіту. Такі матеріали мають рекордні характеристики при швидкісному терті у рідинах та газовому середовищі [8].

Компанія «НЕОПРОМ ІНЖИНІРІНГ» (м. Харків) у партнерстві з ДО «Машинобудівний завод ФЕД» (м. Харків) випускає паливні насоси для літаків. Конструктивною одиницею такого паливного насоса є антифрикційний

підшипник «мідь–свинець–графіт». Підприємствам України, які виготовляють підшипники ковзання методом порошкової металургії, зараз не вдалося отримати необхідні характеристики.

Однією з основних технологій виготовлення антифрикційних виробів є

схема, наведена на рис. 1. Схема містить у собі приготування суміші з порошків, насичення мастилом, пресування, спікання, калібрування. У деяких випадках вироби піддають додатковим видам обробки: термічній, механічній, інколи хіміко-термічній [9].

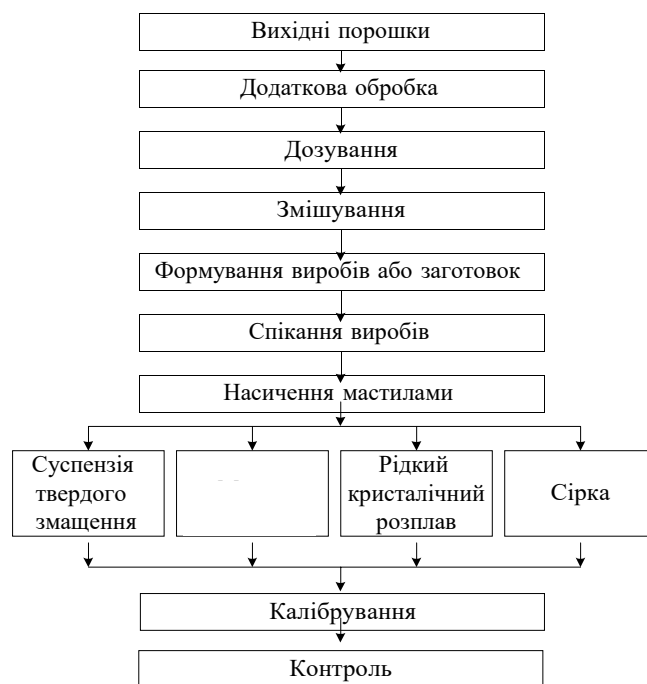


Рис. 1. Схема технології виготовлення антифрикційних виробів

Таким чином, можна зробити висновок, що питання отримання композиційного матеріалу «мідь–свинець–графіт» з необхідними характеристиками різними методами до кінця є невирішеним і актуальним.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей консолідації антифрикційних матеріалів на основі порошкової суміші «мідь–свинець–графіт».

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– запропонувати технологію отримання антифрикційного матеріалу з гомогенними властивостями, з підвищеним ресурсом роботи, без використання трудомісткого і дорогого процесу гарячого пресування;

– підібрати відповідні оптимальні додаткові компоненти для підвищення щільності та механічних властивостей матеріалу підшипника;

– визначити технологічну можливість зниження вмісту свинцю в складі матеріалу підшипника;

– розробити технологічний процес і підібрати оптимальний склад для підвищення однорідності матеріалу та ресурсу роботи підшипника.

Основна частина дослідження
Підготовка шихтових матеріалів.

До операції шихтування порошки зазвичай піддаються підготовчим обробкам: при підвищеному вмісті кисню – відновлювальному відпалу (для заліза – 700–800 °С у водні), розмелюванню, розсіву

на фракції, сушінню, прожаренню. Графіт піддають прожаренню при високих температурах (близьких до температури спікання майбутнього виробу) для видалення вологи та домішок. Сірку і сульфід висушують при низьких температурах для видалення адсорбованої вологи.

Подрібнення вихідних матеріалів, яке часто суміщає й операцію змішування вихідних компонентів, є дуже відповідальною операцією. Результат цього залежить від величини завантаження, кількості розмельних тіл, часу змішування, наявності або відсутності рідини, що вводиться в розмелювальний агрегат.

При використанні сумішей, що складаються з металевих порошоків, близьких за густиною, застосовують сухе перемішування без розмельних тіл. Для сумішей, які містять графіт, сірку або інші сухі мастила, використовують змішувачі без розмельних тіл (типу конусних, з ексцентриковими осями), щоб уникнути намазування речовин, що відіграють роль твердого змащення, на частинки порошоків металів.

При так званому мокрому змішуванні як зволожувач використовують 0,5–1 % машинного мастила (для матеріалів, що містять графіт або вуглець в іншому вигляді); до 2–3 % бензину або спирту; 1–3 % гліцерину в спирті тощо. Призначення зволожувача – усунути ліквіацію і запилювання легшого за густиною компонента шихти (графіту, сірки, сульфідів) [14].

Зазвичай змішувач заповнюють не більше ніж на 1/3 частину його об'єму. Рекомендується певна послідовність у завантаженні в змішувач окремих складових шихти. Першими завантажуються металеві порошки, потім вводиться графіт або інші добавки. Після перемішування цієї присадки протягом 5–10 хв вводять інші неметалеві присадки. Суміш у сухому стані перемішують приблизно 1–1,5 год, після чого до неї додають зволожувач і процес продовжують ще протягом 30 хв.

Допускається попереднє змішування металевих порошоків із зволожувачем з подальшим введенням речовин, що відіграють роль сухого мастила.

При необхідності забезпечення одночасного змішування рекомендуються високошвидкісні змішувальні установки – атритори.

Для збереження від окислення порошоків при подрібненні конструкція атритора передбачає можливість напуску в камеру захисного газу.

При подрібненні і змішуванні тонких порошоків можливе погіршення їх плинності. Цей недолік усувають збільшенням розміру початкових частинок, гранулюванням шихти, плакуванням неметалевих порошоків металами та ін.

Для плакування застосовують міднення та нікелювання графітового порошку хімічними і електрохімічними методами. Грануляцію тонких металевих порошоків здійснюють за допомогою добавок водного розчину полівінілового спирту, силікату натрію, рослинних речовин, що клеять, введенням розчину гліколю або камфори в етиловому спирті та ін.

Формування виробів. Вироби з підготовленої шихти формують різними методами: одно- і двостороннім пресуванням в пресформах на холоді, одинарним та подвійним пресуванням з проміжним спіканням, гідростатичним та ізостатичним пресуванням, спіканням під тиском, куванням і штампуванням попередньо спечених заготовок, гарячим динамічним пресуванням, вибуховим пресуванням, прокаткою, екструзією, мундштучним пресуванням, шлікерним литтям тощо [15, 16].

Більшість деталей вузлів тертя пресують із суміші вихідних порошоків на гідравлічних або механічних пресах у пресформах, виготовлених із загартованих легованих сталей або твердих сплавів. Існує велика різноманітність типів пресформ залежно від конструкції пресованих виробів і методу пресування.

Зазвичай при пресуванні підшипників застосовують двостороннє пресування. Ізостатичне пресування, як правило, використовується при високих температурах [17]. У цьому випадку як робоче середовище служать інертні гази або рідкі метали.

Пресування виробів з пористістю 15–35 %, оптимальною для антифрикційних і спечених виробів, що працюють у режимі самозмащування, проходить при одноразовому пресуванні. Вироби з меншою пористістю потребують дворазового пресування з проміжним відпалом чи інших методів ущільнення.

Величини тисків, що застосовуються при пресуванні, залежать від міцності і пластичності пресованого матеріалу, наявності мастила, конструкції пресформи, необхідної кінцевої густини та інших факторів. Наприклад, для пресування виробів з порошоків заліза, міді, нікелю до пористості 15–20 % необхідний тиск 590–690 МПа; для олова, свинцю тиск знижують до 98 МПа.

Застосування сумішей порошоків з різним розміром часток, додавання м'яких металів до жорсткіших і твердих порошоків дає змогу значно зменшити необхідний тиск пресування для одержання заданої густини.

Спінання. Спінання – одна з головних операцій технології виготовлення металів методами порошкової металургії [18, 19]. У процесі спінання конгломерат з частинок речовин, що входять у вихідну шихту, перетворюється в композиційний матеріал, що складається з металевої матриці і пор або з металевої матриці, пор, неметалевих включень, інших складових, які залягають в основі металевої матриці. Процес спінання супроводжується зміною густини, об'єму, маси спеченого брикету, утворенням нових фаз – продуктів взаємодії, які вводяться згідно з діаграмами стану та характером їх взаємодії [20, 21]. Є велика різноманітність варіантів процесів спінання, а саме: за характером основного процесу – спінання у твердій фазі і за наявності рідкої фази; за характером захисних середовищ – спінання

в газовому і відновному середовищі, у вакуумі, у герметичних коробках з твердим засипанням; за характером нагрівання – спінання в електричних печах з радіаційним нагріванням, з індукційним нагріванням, з електророзрядним нагріванням; за типом обладнання – спінання в прохідних конвеєрних або штовхальних печах, в садочних печах тощо [22, 23].

Для експериментальних робіт при виготовленні невеликих партій виробів використовують печі періодичної дії з ручним пересуванням виробів.

Для спінання у вакуумі застосовуються вакуумні печі з індукційним нагріванням, як правило, для виготовлення невеликих дослідних партій виробів.

Для спінання порошкових матеріалів в інертному середовищі або в середовищі, у якому проводиться насичення деякими елементами, використовують герметичні контейнери з жароміцної сталі. Вироби закладають у контейнер під засипкою, яка може містити речовини, що дають змогу проводити одночасно зі спінанням хіміко-термічну обробку (азотування, карбонізацію, силіціювання, хромування та ін.). Герметичність контейнера в процесі нагрівання забезпечується затвором, який засипається піском і порошком речовин, що плавляться при нагріванні, забезпечуючи герметизацію внутрішнього простору.

У процесі спінання залежно від складу шихти окремі компоненти можуть повністю або частково реагувати один з одним, утворюючи нові сполуки, або залишатися у вигляді інертних включень.

Інтервал температур спінання зазвичай вибирають у межах 70–80 % температури плавлення металу, проте в кожному окремому випадку він уточнюється експериментально з урахуванням необхідних властивостей, структури композиційного матеріалу та виду виробів.

У процесі спінання змінюються розміри виробу. Усадка матеріалу при спінанні залежить від температури, часу, складу захисного середовища і вихідної

густини заготовок. У ряді випадків, наприклад при підвищенні густини мідних заготовок, можливе збільшення розмірів брикету замість усадки, тому що при взаємодії водню, який дифундує, з оксидами міді утворюються пари води, які створюють підвищений тиск газів унаслідок більшого об'єму молекул парів води порівняно з об'ємом водню.

Отримання антифрикційних матеріалів на основі міді. Основним завданням є створення більш простого способу отримання антифрикційних порошкових матеріалів на основі міді, що забезпечує зниження зносу сполучених з ними деталей, які розміщені у вузлах тертя.

Поставлене завдання вирішується методом отримання порошкових антифрикційних матеріалів на основі міді та має основні етапи: приготування шихти, що містить порошки міді, графіту та свинцю, її пресування при тиску 250–270 МПа та спікання в захисному середовищі при температурі 890–910 °С протягом не менше 60 хв.

Для збільшення густини антифрикційного матеріалу отриману шихту цього матеріалу піддають додатковому відпалу (рекристалізації) перед основним спіканням при температурі 550–600 °С протягом 1,5–2 год.

Введення в шихту порошку міді активізує дифузійні процеси при спіканні, зменшуючи тим самим ефект обволікання частинок міді графітом у процесі спікання, що перешкоджає утворенню та росту контактів між частинками під час спікання. Крім того, введення порошку міді забезпечує появу рідкої фази при спіканні, що сприяє утворенню контакту між частинками і сприятливо впливає на кінетику спікання і формування структури матеріалу, збільшуючи його густину.

Загальний вміст міді встановлюється таким чином, щоб забезпечити необхідну густину, пористість і усадку матеріалу при спіканні виробів.

Вміст графіту в шихті забезпечує високий мастильний ефект, одночасно

даючи змогу зберегти високу міцність одержуваного матеріалу, тобто надає останньому високі експлуатаційні властивості.

Розміри частинок порошку міді і графіту, які безпосередньо використовуються при виготовленні цього виробу, справляють істотний вплив на якість одержуваних матеріалів, оскільки зі зменшенням розміру частинок погіршуються їхні пресувальні характеристики (усадка), однак міцність пресованих виробів з більш дрібних порошоків виявляється вищою, ніж міцність виробів, отриманих з крупнішого порошку того ж металу.

Розміри частинок порошку впливають на вибір тиску при пресуванні. З підвищенням дисперсності частинок зменшується насипна густина порошку, збільшується питома поверхня і поверхня тертя частинок, а отже, для отримання пресованих виробів заданої густини необхідний більш високий тиск.

Теоретично й експериментально підібрано оптимальний для цього методу розмір частинок порошку міді і графіту для отримання антифрикційних порошкових матеріалів на основі міді – 250 мкм.

Після додаткового відпалу зростає пластичність частинок порошку і збільшуються їхні пресувальні характеристики. Ця операція має важливий внесок у зниження коефіцієнта тертя, а також інтенсивності зношування одержуваних антифрикційних виробів за рахунок отримання більш щільних заготовок як після пресування, так і після спікання. Цей інтервал навантаження при формуванні виключає можливість того, що матеріал не пройде повну усадку під час пресування, що призводить до недостатньої міцності виробів, і водночас не допускає розшарування матеріалу й утворення тріщин, причиною яких може бути занадто високий тиск навантаження.

Під час спікання заготовки без захисного середовища відбувається окислення поверхні частинок. У процесі спікання заготовок у відновному

середовищі йде відновлення-перебудова решітки оксидів у решітку металу. Надалі безпосередній контакт між частинками в міру нагрівання збільшується доти, поки пори повністю не закриваються.

Оптимальна швидкість нагрівання заготовок міститься в інтервалі 1,5–1,7 °C/c і забезпечує високу якість одержуваного матеріалу й одночасно досить високу продуктивність процесу.

Завдяки своїй структурі, яка підкоряється принципу Шарпі, коли в пластичній основі рівномірно розподілені тверді вclusions, на які спираються при терті контртіла, наприклад вал, ці матеріали мають гарні триботехнічні властивості.

Процес тертя для таких матеріалів має такий вигляд: у ході припрацювання м'яка матриця інтенсивно зношується до появи твердих кристалів із загальної маси, припрацювання закінчується, коли контртіло (вал, опорна п'ята) починає повністю спиратися на тверді частинки, які забезпечують високу зносостійкість антифрикційного матеріалу. М'яка основа при цьому, зношуючись швидше, утворює мережу каналів (мікрорельєф) між виступаючими кристалами, по яких циркулює мастило. Пластична основа (матриця) забезпечує захисну реакцію (пружну або пластичну деформацію та ін.) всього підшипникового матеріалу, що впливає на зміну умов тертя і великі показники припрацювання.

Є ще один метод отримання порошкового антифрикційного матеріалу на основі міді (склад, %мас.: алюміній 10,5–12; залізо 0,5–1,5; порошок нікель-титанового сплаву ПН 45155 4–8; графіт 0,3–4; мідь ін.), за яким експлуатаційні триботехнічні властивості запропонованих спечених матеріалів вищі порівняно з аналоговими. Цей метод належить до порошкової металургії, зокрема до спечених антифрикційних матеріалів на основі міді для виготовлення антифрикційних деталей, що мають працювати в умовах змащення при середніх і високих навантаженнях.

Відомі спечені антифрикційні матеріали на основі міді з добавками алюмінію, заліза, нікелю, титану для виготовлення антифрикційних, стійких до зносу, композиційних матеріалів і деталей, що працюють в умовах самозмащення. Недоліками відомих матеріалів є підвищений знос і порівняно невисокі початкові допущені навантаження на деталі, які працюють в умовах тертя. Основна мета технології отримання матеріалу з поставленими характеристиками – підвищення зносостійкості відомих спечених матеріалів на основі міді при граничних характеристиках самозмащування і більш високих навантаженнях при терті, збільшивши характеристики міцності на стиск (основний показник міцності для підшипникових матеріалів).

Поставлені завдання вирішено завдяки поліпшенню хімічного складу введенням нових додаткових компонентів. Суть нових змін полягає в тому, що додаються нові матеріали до складу. Введення до складу матеріалу порошку ПН45Т55, що складається головним чином з титано-нікелевого інтерметаліду, призводить до дисперсійного зміцнення поверхневих шарів тертя, завдяки чому опір на місцях з найбільшою зношуваністю збільшується, що призводить до зменшення зносу, підвищення гранично допустимих навантажень, міцності матеріалу. Таке зміцнення більш ефективно завдяки зміцненню розчину міді із залізом, тому кількість останнього слід дещо зменшити. Крім того, введення до складу запропонованого матеріалу графіту сприяє поліпшенню граничного змащення (завдяки утворенню масляно-графітової суспензії), що призводить до надійнішого розділення поверхні сталюого вала та підшипника, які мають тертя, і як наслідок, збільшення допустимих навантажень, зниження зносу.

Експериментальна частина. У роботі потрібно було використати іншу технологію виробництва заготовки антифрикційного матеріалу на основі міді. З огляду на це маємо такі дані:

– пресування сухої композиції порошків при тиску 200 МПа призводить до появи пресувальних тріщин, які не ліквідуються в процесі спікання у вакуумі, та недостатньої густини кінцевого продукту (4,4–4,8 г/см³);

– при спіканні у вакуумі через випаровування свинцю (який має високу пружність пари у цих умовах) спостерігається неомогенність розподілу елементів у виробі.

Представлений зразок замовника мав густину 5–5,2 г/см³ і твердість за Брінеллем 26–28 НВ. Ураховуючи, що твердість гаряче-пресованих виробів становить 6,0–6,2 г/см³ та має твердість 48 НВ, та з огляду на перераховане можливо зробити такі висновки:

– за рахунок значного перевершення густини і твердості можливі великі пружні навантаження в об'ємі матеріалу, які призводять до розширення після механічної обробки;

– використання вакууму у цьому випадку при спіканні виробів не є доцільним, а оскільки спікання у повітряному середовищі призводить до окиснення всіх компонентів суміші, то потрібно використовувати атмосферу інертних газів;

– використання тиску при компактуванні менше 200 МПа не є доцільним, тому потрібно використовувати більш ефективні добавки та більші значення тиску.

Обладнання та матеріали. У роботі використовувались порошки міді марки

ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009 до 100 мкм), свинцю марки ПС-1 (ГОСТ 16138-78 до 60 мкм) і графіт марки ЕГ-1, отриманий подрібненням і просіюванням порошку через сито менше 80 мкм.

Заготовки підшипників марки МСП відповідно до ТУ 16-538.157-72 повинні мати такий склад: мідь 75–80 % мас.; свинець 8–11,5 % мас.; графіт 12–13,5 % мас. Твердість матеріалу – 80–180 МПа. При механічній обробці різцями і фрезами матеріал не повинен кришитись.

Розміри заготовки для антифрикційного підшипника МСП повинні мати такі розміри: діаметр зовнішній – 81 мм; діаметр внутрішній – 58 мм; висота – 25 мм.

У цій роботі було використано таке обладнання: кульовий млин з поліуретану; вібраційний млин; три різних гідравлічних преси (ПГПр зусиллям 4 т; Dezimalpresse DP 36 – 50 т; ДГ2434 – 250 т); вакуумна піч СШВЕ-1,25; дві пресформи.

Порошки міді і свинцю було закуплено, а порошок графіту отримано методом подрібнення електрографіту ЕГ-1 у вібраційному млині (рис. 2). Після подрібнення графіт просіювався для отримання однорідного за розміром порошку, відсіювалась різна дисперсність. Графіт з дисперсністю менше 60 мкм і 100 мкм не використовувався, оскільки він не підходить для отримання цього матеріалу. Основною причиною є поява пресувальних тріщин.



Рис. 2. Вібраційний млин для подрібнення графіту

Змішування компонентів суміші проходило в кульовому млині з поліуретану, враховуючи відомості [24]. Пресування відбувалось у жорсткій сталевій формі з необхідними розмірами на пресах ПГПр4 (рис. 3), ДР-36 та ДГ2434 при зусиллі 4,50 та 200 т відповідно. Для спікання зразків матеріалу МСП використовувалась вакуумна піч СШВЕ-1,25 при температурі до 900 °С.



Рис. 3. Прес для формування зразків ПГПр

Пресування на зразках, на яких проводилися первинні дослідження (підбір тиску, температури спікання і додаткового пресування), виконувались на пресі ПГПр4 з тиском 500 МПа.

Технічні характеристики преса ПГПр4 такі: діаметр великого поршня – 58 мм; діаметр малого поршня – 10 мм; хід великого поршня – 60; хід малого поршня – 20; максимальна відстань між поршнем і верхньою плитою – 120.

Пресування проводилося в жорсткій сталевій пресформі (рис. 4), а спікання – у графітовій (рис. 5), які було зроблено під потрібні розміри зразків.



Рис. 4. Сталева пресформа



Рис. 5. Графітова пресформа

Після отримання потрібних характеристик на малих зразках було

використано гідравлічний прес ДГ2434 (рис. 6) із зусиллям до 250 т. Технічні

характеристики гідравлічного преса ДГ2434 такі: номінальне посилення преса, кН(тс) – 2500(250); найбільший хід штока (повзуна), мм – 710; найбільша відстань між столом і штоком – відкрита висота преса, мм – 1250; розміри столу, мм – 1120/1000; номінальне посилення нижнього поршня вгору, кН(тс) – 500(50); хід нижнього поршня, мм – 360; швидкість робочого ходу поршня (при ході

вгору), мм/с – 5–30; швидкість поворотного ходу поршня (при ході донизу), мм/с – 80; максимальна витримка під тиском, с (хв) – 1–1000 (16).

Після пресування суміші порошків проводилось спікання у вакуумній печі СШВЕ-1,25 з максимальною температурою до 2500 °С (рис. 7).



Рис. 6. Гідравлічний прес ДГ2434



Рис. 7. Вакуумна піч СШВЕ-1,25

Дослідження технологічних параметрів отримання заготовки МСП (підготовка шихти, пресування, спікання, повторне пресування) проводилось на зразках (рис. 8) діаметром 11,5 мм та висотою 15–25 мм. Після визначення цих параметрів було отримано заготовку з урахуванням лінійних розмірів.

Перша партія зразків була виготовлена з порошків без додавання органічних рідин, що призвело до появи пресувальних тріщин при тиску більше 200–250 МПа. Відомо, що додавання деяких органічних рідин допомагає отримати більшу густину та міцність при збільшенні тиску без

пресувальних тріщин [25]. Було використано три рідини: бензин, спирт і гас. Використання гасу дало змогу отримати більш технологічні суміші.

Під час спікання зразка у вакуумі гас розпадається на легкі вуглеводні та піролізний вуглець (коксівий залишок), який, можливо, знижує випаровування свинцю. При додаванні спирту та бензину спостерігалось швидке випаровування цих рідин, що не давало змоги отримати зразки з потрібними властивостями. Було виявлено оптимальну концентрацію гасу при додаванні його в суміш (рис. 9).



Рис. 8. Отримана заготовка

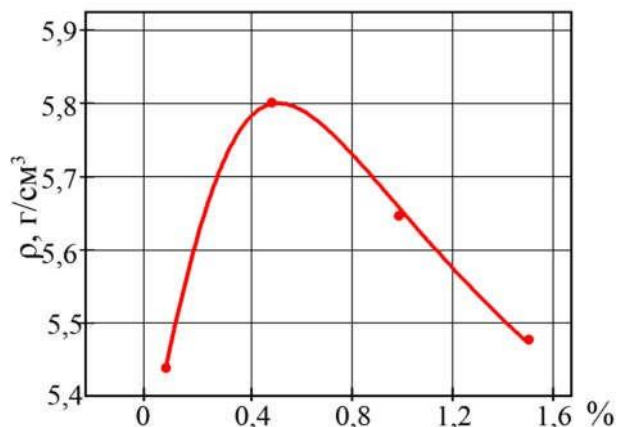


Рис. 9. Залежність густини від концентрації газу в суміші

Вихідні порошки міді 100 та 200 мкм змішувались у різних пропорціях за вмістом міді, % мас.: 25/75, 50/50, 75/25. Змішування різних фракцій міді з графітом і свинцем з додаванням різної концентрації газу показало й дало змогу підібрати більш оптимальний варіант отримання зразка. Додавання фракції міді 25/75 % з додаванням 0,1 % газу при тиску 500 МПа до і після спікання призвело до появи пресувальних тріщин, зразки яких мали густину 5,6 г/см³. З додаванням газу в концентрації 0,5 % з тими самими параметрами тиску було отримано зразок без появи пресувальних тріщин із густиною 5,9 г/см³. Концентрація газу 1 % приводить до рівномірного змішування суміші без появи пресувальних тріщин з густиною 5,8 г/см³. Фракція міді 50/50 % мас. Додавання 0,1 % газу також призвело до

появи пресувальних тріщин тільки з кращою усадкою шихти і густиною 5,85 г/см³. При додаванні газу в концентрації 0,5 % суміш рівномірно розподілилась при змішуванні, після пресування при тиску в 500 МПа пресувальних тріщин не було знайдено, отримана густина 6,05 г/см³. За концентрації газу 1 % отримана густина 5,97 г/см³. Для суміші з концентрацією міді з дисперсністю 75/25 %, мас. аналогічні параметри змішування, пресування і кінцевої густини як у суміші з концентрацією міді з дисперсністю 25/75 %, мас.

Після проведення цих досліджень і порівняння отриманих характеристик було вирішено продовжити проводити подальші дослідження на суміші з дисперсністю міді 50/50 % мас, оскільки отримана густина і твердість отриманого зразка мала потрібні значення (рис. 10).

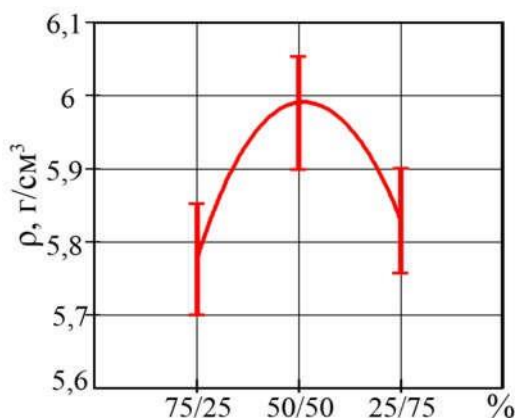


Рис. 10. Залежність густини від концентрації міді з різною дисперсністю

Спикання зразків без додавання гасу і пресування при тиску 200 МПа приводить до втрати свинцю до 20 % при температурі 900 °С. Відпресовані з додаванням гасу зразки композиту при тиску 500 МПа і подальшому спіканні при тій самій температурі втрачали 12 % мас. свинцю. Для зменшення втрат свинцю (який є отруйним), було запропоновано замість вакууму використовувати інертні гази – аргон, азот та вуглекислий газ. Аргон значно дорожчий за азот, а вуглекислий газ при термічних процесах може мати окислювальні властивості [26], тому було обрано азот. Для спікання зразків, після попереднього вакуумування, було здійснено напуск азоту у вакуумну камеру до 1 атм. У процесі нагрівання тиск у камері збільшувався до 1,2 атм. Спикання зразків при температурі 900 °С показало зменшення втрати свинцю до 2–5 %.

Додаткове пресування зразка після спікання дає змогу отримати густину на 3–5 % більшу ніж у зразку, який не проходив додаткове пресування. Цей метод дає змогу досягти густини 6,05–6,2 г/см³ і твердості 42–48 НВ.

Для виготовлення заготовки МСП підшипника була використана сталева пресформа. Початкове пресування виконувалось на пресі ДГ2434 при тиску 140 т. Отримана заготовка відповідала необхідним розмірам, після чого була спечена в печі СШВЕ-1,25 в атмосфері азоту при тиску 1,2 атм і температурі 900 °С протягом 30 хв. Втрата свинцю не перевищувала 3 % мас. Повторне пресування проводилось у тій самій пресформі при тиску 140 т. Після цього заготовку було оброблено на токарному верстаті при різних умовах обробки (рис. 11).

Густина підшипника становила 6,05 г/см³, твердість 47 НВ. Зміни технічних характеристик та розмірів при витримці впродовж 1 місяця виявлено не було.



Рис. 11. Антифрикційний підшипник з матеріалу МСП

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- запропоновано технологію отримання антифрикційного матеріалу з гомогенними властивостями, з підвищеним ресурсом роботи, без використання трудомісткого і дорогого процесу гарячого пресування антифрикційного матеріалу МСП, який не є доцільним через розпухання заготовок після механічної обробки, а також через малу продуктивність і негомогенність отриманого матеріалу (точкові втрати свинцю);

- підібрано відповідні оптимальні додаткові компоненти для підвищення щільності та механічних властивостей матеріалу підшипника, зокрема для отримання густини, більшої ніж 5,4 г/см², було застосовано добавку гасу в суміш, а також збільшено навантаження при пресуванні до 500 МПа;

- визначено технологічну можливість зниження втрати свинцю в складі матеріалу підшипника шляхом використання азотного середовища при тиску 1,2 атм у процесі спікання;

- розроблено технологічний процес та підібрано оптимальний склад для підвищення однорідності матеріалу й ресурсу роботи підшипника, отримано

заготовки антифрикційного матеріалу МСП, а також виготовлено підшипники, які відповідають усім вимогам до виробу

(насамперед підвищується щільність і відповідно, механічна міцність та ресурс роботи підшипників).

Список використаних джерел

1. Tribological and mechanical properties of copper matrix composites reinforced with carbon nanotube and alumina nanoparticles / Y. Pan, X. Lu, A. A. Volinsky, B. Liu, S. Xiao, C. Zhou, Y. Li, M. Chen and X. Qu. *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. Nu. 11. DOI: 10.1088/2053-1591/ab4674.
2. Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник / Е. С. Геворкян, Л. А. Тимофєєва, В. П. Нерубацький, О. М. Мельник. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с.
3. Нові керамічні композиційні матеріали інструментального призначення: монографія / Р. В. Вовк, Е. С. Геворкян, В. П. Нерубацький та ін. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. 200 с.
4. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування Al_2O_3 при прямому пропусканні змінного електричного струму з частотою 50 Гц. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 110. С. 45–52.
5. Moazami Goudarzi M., Jenabali Jahromi S. A., Nazarboland A. Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material. *Materials and Design*. 2009. Vol. 30, Iss. 6. P. 2283–2288.
6. Composite material for instrumental applications based on micro powder Al_2O_3 with additives nano-powder SiC / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, A. A. Kagramanyan, V. P. Nerubatskiy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.
7. Структура и магнитные свойства нанопорошков Cu–Co и Cu–Fe, полученных в ультразвуковой мельнице / В. М. Надутов, А. Е. Перекос, Б. Н. Мордюк, В. З. Войнаш, В. П. Залуцкий, Н. А. Пискун, Т. Г. Кабанцев. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39, № 4. С. 525–539. DOI: 10.15407/mfint.39.04.0525.
8. Effects of Strong Pulse Current on Microstructure and Properties of Cu-20Pb Eutectic Alloy / T. Yu, L. Zhang, D. Wang, C. Qin, G. Geng. *Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2018. Vol. 38, Iss. 12. P. 1389–1392.
9. Вайнштейн В. Э., Троянская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. Москва: Машиностроение, 1968. С. 58–60, 84–88.
10. Геворкян Э. С., Нерубацький В. П., Мельник О. М. Горячее прессование нанопорошков состава ZrO_2 -5% Y_2O_3 . *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 119. С. 106–110.
11. Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування при спіканні тугоплавких нанопорошкових з'єднань. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 20–22 травня 2009 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Ч. 1. С. 362.
12. Cutting composite material based on nanopowders of aluminum oxide and tungsten monocarbide / E. S. Gevorkyan, V. P. Nerubatskiy, V. O. Chyshkala, O. M. Morozova. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 15. Part 2. P. 6–14. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-02-020.
13. Composite material for instrumental applications based on micro powder Al_2O_3 with additives nano-powder SiC / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, A. A. Kagramanyan, V. P. Nerubatskiy.

International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.

14. Спеченный антифрикционный материал на основе меди: Патент 790821 / Альтман В. А., Боровинская И. П., Валакина В. М., Глускин Я. А., Мемелов В. Л., Прокудина В. К., Щепинова Л. П., Беляков В. А. Оpubл. 15.04.1994.

15. Effect of high density electric current pulse on solidification of Cu-37.4 wt.%Pb monotectic alloy melt / T. Ma, G. Geng, X. Sun, X. Hao, W. Hao. *Materials Science*. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 34–40. DOI: 10.5755/j01.ms.26.1.21060.

16. Some features of ceramic foam filters energy efficient technologies development / E. S. Gevorkyan, V. P. Nerubatskyi, Yu. H. Gutsalenko, O. M. Morozova. *Modern engineering and innovative technologies*. 2020. Iss. 14. Part 1. P. 46–60. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-014.

17. Helle A. S., Easterling K. E., Ashby M. F. Hot-Isostatic Pressing Diagrams: New Developments. *Acta Metallurgica*. 1985. Vol. 33, No. 12. P. 2163–2174.

18. Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method / L. Wang, X. H. Zhong, Y. X. Zhao, S. Y. Tao, W. Zhang, Y. Wang, X. G. Sun. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014. Vol. 2. P. 102–116.

19. Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures / E. Gevorkyan, V. Nerubatskyi, Yu. Gutsalenko, O. Melnik, L. Voloshyna. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (108). P. 41–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216733.

20. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. До питання отримання тонкодисперсних структур з нанопорошків оксиду алюмінію. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 151–167.

21. Arzt E. L., Ashby M. K. Easterling K. E. Practical Applications of Hot-Isostatic Pressing Diagrams Four Case Studies. *Metallurgical Transactions*. 1983. Vol. 14A, No. 1. P. 211–221.

22. Novel Design of Copper–Graphite Self-Lubricating Composites for Reliability Improvement Based on 3D Network Structures of Copper Matrix / X. Jiang, J. Song, Su Y., Y. Zhang, L. Hu. *Tribology*. 2018. Vol. 66, Iss. 4. DOI: 10.1007/s11249-018-1098-7.

23. Technological Parameters of Production and Properties of Babbit-Based Composite Surfacing Rods and Deposited Antifricition Coatings / I. E. Kalashnikov, A. G. Kolmakov, L. K. Bolotova, P. A. Bykov, L. I. Kobeleva, R. S. Mikheev, M. L. Kheifets. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10, Iss. 3. P. 635–641.

24. Вплив ультразвукового оброблення в кульовому млині на фазово-структурні характеристики високодисперсних порошкових сумішей 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. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40, № 4. С. 501–514. DOI: 10.15407/mfint.40.04.0501.

25. The formation of ZrO₂-Y₂O₃-nanoparticles from fluoride solutions / E. S. Gevorkyan, O. M. Morozova, D. S. Sofronov, V. P. Nerubatskyi, N. S. Ponomarenko. Abstracts of the II International Advanced Study Conference on Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021 "CM<P 2021" (6–12 June 2021, Kharkiv). Kharkiv: FOP Brovin O. V., 2021. P. 190.

26. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький. Харків: Діса плюс, 2015. 344 с.

Чишкала Володимир Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (097) 242-05-56. E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Литовченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (050) 694-33-21. E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16.

E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Мазілін Богдан Олександрович, аспірант кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (099) 714-89-05.

E-mail: mazilin@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0003-1576-0590.

Chyshkala Volodymyr Oleksiyovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (097) 242-05-56.

E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Lytovchenko Serhii Volodymyrovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (050) 694-33-21.

E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Mazilin Bogdan Olexandrovych, Postgraduate, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (099) 714-89-05. E-mail: mazilin@karazin.ua.

ORCID iD: 0000-0003-1576-0590.

Статтю прийнято 25.11.2021 р.