

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.762

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/02>

**Казмиренко Ю.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Лебедєва Н.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Довженко Д.В.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Риженко М.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Баюнов А.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

### ФОРМУВАННЯ КАРКАСНОЇ СТРУКТУРИ ПРЕСОВОК З ПОРОШКУ ТА СТРУЖКИ МІДІ

*Актуальність досліджень зумовлена необхідністю застосування мідних пористих матеріалів у енергетичному машинобудуванні, хімічній промисловості, авіабудуванні тощо. Методами порошкової металургії виготовляються антифрикційні вироби, паливні та фільтрувальні елементи, пористість яких перевищуватиме 30 %. Технологічний цикл складається з операцій підготовки порошку, його пресування, спікання та наступного просочення рідкими компонентами. Порошки міді є дефіцитною і дороговартісною сировиною. Проте у чистому вигляді порошок міді не матиме тих властивостей, які необхідні для формування функціональних матеріалів. Тому за основу обирається пористий каркас, для виготовлення якого доцільно використовувати виробничі відходи, зокрема здрібнену стружку. Це спрямовано на вирішення проблеми ресурсозбереження. Мета роботи полягатиме у порівняльних дослідженнях процесів формування каркасної структури пресовок з порошку електролітичної міді та порошку, одержаного здрібненням мідної стружки.*

*Експериментальні роботи включали у себе: холодне однобічне пресування порошків на лабораторному пресі з питомим осьовим тиском 20 МПа, спікання заготовок при температурі 450...500°C у герметично зачиненому графітовому контейнері у лабораторній печі з окиснювальною атмосферою. За критерії структурних змін обрано розмір та форму пор, мікротвердість та ступінь деформації порошку, які визначалися на етапах пресування і спікання. Для досліджень застосовані методи оптичної металографії та механічних випробувань. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість формування каркасної структури пресовок з порошку, одержаного здрібненням мідної стружки. Експериментально отримані заготовки відрізняються від пресовок з порошку електролітичної міді більш розвинутою пористою структурою, що є переважним для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.*

*Перспективи наступних досліджень пов'язані з розширенням експериментальних робіт щодо впливу технологічних параметрів на формування спеціальних властивостей пористих мідних матеріалів.*

**Ключові слова:** порошок міді, мідна стружка, холодне однобічне статичне пресування, структура.

**Постановка проблеми.** Ефективність застосування мідних пористих матеріалів у енергетичному машинобудуванні, суднобудуванні, хімічній промисловості, авіабудуванні зумовлена їх коро-

зійною стійкістю, тепло- і електропровідністю, зносостійкістю. З них виготовляються антифрикційні вироби, паливні та фільтрувальні елементи. Їх певні функціональні властивості визначаються

не тільки хімічним складом компонентів, а й каркасною структурою, для формування якої застосовуються методи порошкової металургії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Управління фізико-механічними процесами і регулювання характеристик пористих мідних матеріалів є *складною науково-практичною задачею*, вирішення якої спрямовано на вибір та розробку раціональних та ресурсозберігаючих технологій.

В роботі [1, с. 27-34] процеси формування пористих структур спечених порошкових матеріалів розглядаються за допомогою моделей, які враховують вплив геометрії пакування частинок губчастого титану на практичний процес регулювання пористості пресовки у межах 30...65 %.

Дослідження, наведені в роботі [2, с. 24-28], показують важливість процесів структуроутворення майбутнього матеріалу саме на етапі пресування. Автор аналізує форму пор, яка утворюється при пресуванні несферичних порошоків. Експериментальні дослідження проведені для суміші порошку заліза губчастою форми з пороутворювачем – бікарбонатом амонію, який являє собою кристали неправильної форми. Підкреслено вплив величини однобічного статичного тиску (від 100 до 700 МПа) на витягнуту форму пор.

Результати досліджень процесів консолідації антифрикційних матеріалів композиції Cu–Pb–С методами порошкової металургії висвітлені авторами роботи [3, с. 7-21]. Завдяки підібраним технологічним параметрам підготовки суміші, холодного пресування при 500 МПа та спікання при температурі 900 °С вироби гомогенної структури не матимуть тріщин і гарно обробляються різанням.

Складність підготовки порошоків електролітичної міді висвітлено у роботі [4, с. 55-64]. Авторами досліджуються процеси розмелу порошку у аتریаторах та у млинах планетарних і вібраційних типів. В залежності від режимів обробки та використаного обладнання одночасно матимуть місце процеси диспергування і агломерації. На підставі вищевикладного аналізу слід зазначити, що порошок міді, особливо електролітичної, являє собою дефіцитну сировину з високою хімічною чистотою, застосування якої у технологіях порошкової металургії не завжди є доцільним і рентабельним.

Вирішення проблем заміни мідного порошку полягатиме у використанні як сировинної бази виробничих відходів, чому присвячено роботи [5, с. 93-215; 6, с. 101-109]. У роботі [5, с. 93-215] авторами підкреслено, що переробка вторинних ресурсів міді являє собою важливу науково-технічну проблему, вирішення якої полягатиме у сор-

туванні лому та відходів, класифікації їх за розмірами, подрібненні, компактуванні з наступною переплавкою. Для цього застосовуються технології плавлення мідевмісних відходів у шахтних, відбивних або електричних печах, що є дуже енергоємним процесом, особливо в умовах воєнного стану і блекаутів. Результати досліджень [6, с. 101-109] підкреслюють актуальність проблеми ресурсозбереження, яка вирішується шляхом розробки технології пакування металеві стружки з подальшим її брикетуванням та переробки на порошок. В роботі як приклад розглядаються випадки формування брикетів зі стружки кольорових металів і сплавів. Практичний досвід формування псевдосплавного покриття з порошку бронзи і стружки бабіту на сталеву поверхню висвітлено в роботі [7, с. 24-27], для чого авторами застосовано технологія гарячого пресування.

В результаті ознайомлення з сучасною практикою отримання мідних пористих матеріалів за методами порошкової металургії [3-7], визначено, що:

- в процесах формування регульованої дрібнозернистої структури перевага надається використанню спеціально підготовленим порошкам електролітичної міді;

- ресурсозберігаючі технології орієнтовані на застосування альтернативних видів сировини, таких як здрібнена стружка з виробничих відходів.

Таким чином, *наукове протиріччя* полягатиме у відсутності теоретичних передумов для розробки спрощених виробничих процесів формування мідних пористих заготівок.

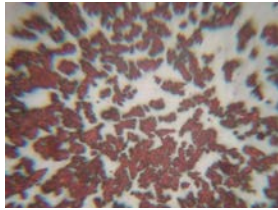
**Постановка завдання.** Мета роботи полягатиме у порівняльних дослідженнях процесів формування каркасної структури пресовок з порошку електролітичної міді та порошку, одержаного здрібненням мідної стружки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

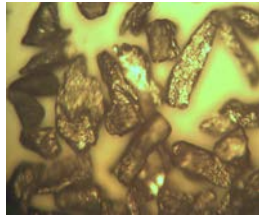
*Матеріали та методи досліджень.* Як науково-методичне підґрунтя для досліджень застосовано науково-практичні напрацювання авторів з формування мідних порошкових матеріалів і виробів [7, с. 24-27; 9, с. 105-106], основи теорії мідних сплавів [8, с. 342-357] та системно-аналітичний підхід до технологій рециклінгу виробничих відходів [10, с. 13-20].

*Вибір та підготовка порошоків.* Вибір вихідної сировини відбувався за двома альтернативними напрямками. У першому випадку застосовано порошок міді марки ПСМ-1 (ДСТУ 4960:2019, ІДТ) дисперсністю 40...60 мкм, у другому – використано пробну партію порошку, отриману шляхом механічного подрібнення стружки

бракованих напівфабрикатів з міді марки М1 (ДСТУ 3211-2009). Оптичні мікрофотографії порошоків наведено на рис. 1.



а,  $\times 150$

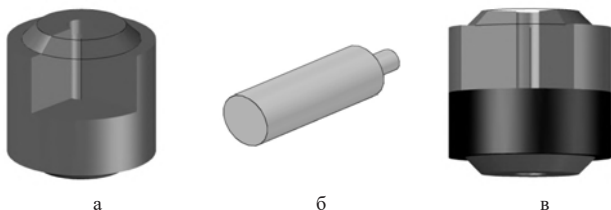


б,  $\times 150$

**Рис. 1.** Оптичні мікрофотографії ( $\times 150$ ) порошку міді марки ПМС-1 (а) і порошку, отриманого механічним здрібненням стружки (б) [світлина зроблено авторами]

Морфологічні характеристики (середній розмір, фактор форми, питому поверхню) частинок досліджено методами оптичної металографії з використанням мікроскопів ММР-2Р і БИОЛАМ-И; мікротвердість порошку визначалась за допомогою приладу ПМТ-3 з навантаженням на індентор 50 мг. Результати досліджень показали, що середня дисперсність отриманого порошку міді (рис. 1, б) складатиме 120...180 мкм, фактор форми ставить 0,3...0,5; насипна щільність належить діапазону 1500...2000 кг/м<sup>3</sup>. Середній розмір частинок порошку електролітичної міді становить 60 мкм, фактор форми – 0,8.

*Пресування порошоків.* В роботі поставлено експериментальну задачу з дослідження можливості формування пористої заготовки за спрощеною технологічною схемою, для чого застосовано метод одnobічного холодного пресування. Порошок без пластифікатора засипали у внутрішню порожнину (висотою 130 мм і внутрішнім діаметром 16 мм) рознімної пресформи, виготовленої з нержавіючої сталі марки 10X18Н9Т (рис. 2). Задля запобігання утворення порожнеч і рихлостей порошок ретельно вирівнювали за допомогою верхнього пуансона, після чого обов'язково вимірювалася висота його засипання, що є необхідним для аналізу усадочних процесів.



**Рис. 2.** Модель прес-форми: матриця (а); верхній пуансон (б); порошок у стані засипки (в) [3D-модель складено авторами]

На світлині (рис. 3) можна побачити як пресформа з порошком розташовується у середині лабораторного пресувального обладнання (FR1000/2), за допомогою якого під поступово зростаючим тиском відбувається формування мідної порошкової пресовки. Максимальне значення прикладеного осьового навантаження контролюється за допомогою манометра і складатиме 4 т (20 МПа). Тиск витримується протягом 1-2 хв, після чого починається процес розпресування.



**Рис. 3.** Лабораторна установка для пресування порошоків [світлина зроблено авторами]

Усадочні і деформаційні процеси досліджувались за результатами визначень лінійних показників засипок порошку та висоти пресовок (рис. 4), мікроскопічних досліджень розмірів і форми мідних порошоків, які були підкріплені вимірюваннями їх мікротвердості у складі шліфованих зразків.



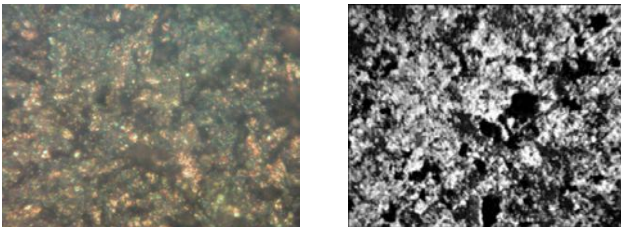
**Рис. 4.** Мідні пресовки [світлина зроблено авторами]

*Аналіз отриманих результатів.* Застосування електролітичного методу дає змогу отримувати тонкі, ультрадисперсні і навіть наноструктуровані порошки міді високої хімічної чистоти [11, с. 36-40]. Тому структура пресовки (рис. 5а), одержаної з порошку марки ПМС-1, являтиме собою щільно спресований каркас ( $\rho = 4800$  кг/м<sup>3</sup>) з дрібними ( $\approx 10...15$  мкм) і круп-



ними ( $\approx 50...55$  мкм) порами округлої форми. Через холодне однобічне статичне пресування усадка порошкового тіла складатиме 35 %. Мікроструктурні дослідження показали незначну (до 5 %) лінійну деформацію частинок у напрямку, перпендикулярному напрямку пресування. Невеликий ступінь пластичного деформування окремих мідних частинок опосередковано підтверджується незначним приростом мікротвердості. У вихідному стані середнє значення  $H_{\mu 50}$  становило 290 МПа, яке після холодного статичного пресування зросло 306 МПа.

На відміну від порошоків електролітичної міді, порошок, отриманий зі стружки є більш пластичним. Під час холодного статичного пресування кожна частинка деформується у середньому на 15%, а загальна усадка пресовки становить навіть 60 %. Мікротвердість  $H_{\mu 50}$  під дією пресування зростатиме майже удвічі: з 200 МПа до 350 МПа, що пояснюється явищем наклепу у пластично деформованому металі. Як показали мікроструктурні дослідження структура пресовки (рис. 5б) являтиме собою каркас щільністю 5100 кг/м<sup>3</sup> з порами еліпсоподібної форми, середній розмір яких становить 60 мкм. Таким чином, можна зробити висновок про доцільність застосування порошку, отриманого здрібненням мідної стружки для формування пресовок методом однобічного статичного пресування.



а б  
Рис. 5. Оптичні мікрофотографії ( $\times 370$ ) мікроструктури мідних пресовок з порошку міді марки ПМС-1 (а) і порошку, отриманого механічним здрібненням стружки (б) [світлина зроблено авторами]

Спінання застосовується для фіксації структури мідних пресовок. У традиційних випадках температурний інтервал обирається як 0,7...0,8 від температури плавлення. Для антифрикційних матеріалів системи Cu-Pb-C він становить 890...910 °C [3, с. 7-21]. Проте у даному випадку за мету ставиться не отримання максимально щільного порошкового тіла, а фіксування пористого каркасу з міцністю, достатньою для подальшого просочення рідкими компонентами. Задачу забезпечення спеціального середовища для спі-

кання мідних пресовок вирішено шляхом застосування герметично зачиненого контейнера (рис. 6), виготовленого з термічно необробленого графіту марки МПГ-6.



Рис. 6. Графітовий контейнер для спікання [світлина зроблено авторами]

Пресовка разом з контейнером зазнавала нагрівання до температури 450...600 °C у лабораторній печі SNOL-1,6.2.08/9-M1 з окисною атмосферою; швидкість підйому температури не перевищувала 30...40 °C/хв. Охолодження зразків відбувалося разом з контейнером і піччю при відкритих дверцятках. Структурні зміни пресовок, зокрема мікротвердість, ступінь деформації порошку, геометрія приконтатної області визначалися при температурі 450...500 °C, що відповідатиме температурі рекристалізаційного відпалу мідних холоднокатаних дротів-провідників [12, с. 97-106]. Заключне формування каркасу пресовки відбувається за механізмом твердофазного спікання з незначним ( $\approx 5...7$  %) збільшенням щільності. Прикладання невеликого тиску пресування (20 МПа) не сприятиме значному деформуванню порошоків у приконтатній області, проте запобігатиме появі пресувальних тріщин. Проте заготівки, які отримані з порошку здрібненої стружки, характеризуються більш розвинутою пористою структурою, що є важливим для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.

Порошкові заготівки, які далі будуть використані у технологіях інфільтрації, можна отримувати без застосування дорогого і складного обладнання.

Одержані результати спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми впровадження безвідходних технологій одержання функціональних порошкових матеріалів.

**Висновки.** Експериментальні роботи включали у себе: холодне однобічне пресування порошоків на лабораторному пресі з питомим

осьовим тиском 20 МПа, спікання заготовок при температурі 450...500 °С у герметично зачищеному графітовому контейнері у лабораторній печі з окиснювальною атмосферою.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість формування каркасної структури пресовок з порошку, одержаного здрібненням мідної стружки. Заготовки відрізняються від пресовок з порошку електролітичної

міді більш розвинутою пористою структурою, що є переважним для подальшого просочення напівфабрикатів іншими речовинами: фторопластом, розплавом срібла, розм'якшеним склом тощо.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням експериментальних робіт щодо впливу технологічних параметрів на формування спеціальних властивостей пористих мідних матеріалів.

#### Список літератури:

1. Клименко Л. П., Андреев В. И., Случак О. И., Прищепов О. Ф., Щесюк О. В. Модель формування пористості брикетів губчастого титану на стадії спікання. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 1 (85) С. 27-34.
2. Руденко Н. О. Дослідження основних структурних характеристик високопористих порошкових матеріалів. *Науковий вісник Донбаської державної металургійної академії*. 2017. № 1 (22Е). С. 24-28.
3. Чишкала В. О., Литовченко С. В., Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Мазілін Б. О. Дослідження особливостей консолідації антифрикційних матеріалів на основі порошкової суміші Cu-Pb-C. *Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 7-21.
4. Гончарук А. О., Хоменко О. В., Найда Ю. І. Особливості розмелу порошку електролітичної міді у млинах різного типу. *Електричні контакти і електроди*. 2014. С. 55-64.
5. Металургія кольорових металів: підручник. Ч.7. Вторинна металургія кольорових металів / Бредихін В.М., Маняк М.О., Смирнов В.О., Пожуєв В.І., Червоний І.Ф., Грицай В.П. Запоріжжя, 2009. 452 с.
6. Чернишов О. О., Чернишов О. В., Чухно С. І., Яновський В. А. Дослідження процесу пакування металеві стружки. *Технічна інженерія*. 2023. № 1(91). С. 101-109.
7. Казимиренко, Ю. О., Лебедева Н. Ю. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2015. № 5/7 (25). С. 24-27.
8. Інженерне матеріалознавство : підручник / Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Самохін С. М. Миколаїв : НУК, 2009. 444 с.
9. Лебедева, Н. Ю., Дрозд О. В., Гашицька О. М., Буренко Г. М. Формування мідних пористих матеріалів з використанням виробничих відходів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25-26 травня 2023 р.) : у 2 т. / відповідальний за випуск: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. Т. 2. Чернігів, 2023. 360 с.*
10. Казимиренко, Ю. О., Дрозд О. В. Системно-аналітичний підхід до підвищення ефективності рециклінгу виробничих скляних відходів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. 2022. № 29. С. 13-20.
11. Павленко Є. В., Єгоров С. Г. Сучасні методи одержання мідного порошку, що містить нанододатки. *Металургія*. 2015. Вип. 1(33) С. 36-40.
12. Федулова О. Ф. Особливості експертного дослідження оплавлень короткого замикання на провідниках, що зазнали тривалого відпалу в умовах пожежі. *Криміналістичний вісник*. 2017. № 2 (28) С. 97-106.

#### Kazymyrenko Yu.O., Lebedieva N.Yu., Dovzhenko D.V., Ryzhenko M.S., Baiunov A.O. FORMATION OF THE FRAME STRUCTURE OF PRESSES COPPER POWDER AND SHAVINGS

*The relevance of the research is due to the need to use copper porous materials in power engineering, chemical industry, aircraft construction, etc. Powder metallurgy methods are used to manufacture antifriction products, fuel and filter elements, the porosity of which exceeds 30%. The technological cycle consists of powder preparation, pressing, sintering and subsequent impregnation with liquid components. Copper powders are scarce and expensive raw materials. However, in its pure form, copper powder will not have the properties that are necessary for the formation of functional materials. Therefore, a porous frame is chosen as a basis, for the manufacture of which it is advisable to use industrial waste, in particular crushed chips. This is aimed at solving the problem of resource conservation. The aim of the work will be to conduct comparative studies of the processes of formation of the framework structure of pressings from electrolytic copper powder and powder obtained by grinding copper shavings.*

*Experimental works included: cold one-sided pressing of powders on a laboratory press with a specific axial pressure of 20 MPa, sintering of blanks at a temperature of 450... 500 °C in a hermetically sealed graphite container in a laboratory furnace with an oxidizing atmosphere. The criteria for structural changes were the size and shape of the pores, microhardness and degree of deformation of the powder, which were determined at the stages of pressing and sintering. Methods of optical metallography and mechanical tests were used for research. The possibility of forming a frame structure of presses from powder obtained by grinding copper shavings has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. Experimentally obtained blanks differ from presses from electrolytic copper powder by a more developed porous structure, which is preferable for further impregnation of semi-finished products with other substances: fluoroplastic, silver melt, softened glass, etc.*

*Prospects for further research are related to the expansion of experimental work on the influence of technological parameters on the formation of special properties of porous copper materials.*

**Key words:** copper powder, copper shavings, cold one-sided static pressing, structure.