

Н.Я. Габльовська¹, Т.М. Павленко¹, А. Клоц-Пташна², Л. Кжемінські², Г. Матула²,
Д. Луковіч², М.А. Кононенко¹, Б.Б. Габльовський¹

Синтез компонентів композитного матеріалу електричних контактів з особливими властивостями для високоамперних електричних апаратів з бездуговою комутацією

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, nadiia.hablovska@nung.edu.ua

²Сілезький технологічний університет, Польща, Anna.Kloc-Ptaszna@polsl.pl

Шляхом проведення експериментальних досліджень встановлено оптимальний склад компонентів для композитного матеріалу, що використовується в електричних контактах, з особливими властивостями, призначених для високострумівих електричних апаратів, які здійснюють комутацію без утворення дуги. В даній статті наведено результати дослідження пористості міді, одержаної за методом порошкової металургії. Для проведення аналізу пористості міді було проаналізовано методи дослідження пористих структур, як на поверхні, так і в тілі зразка. Як найбільш придатними і інформативними було обрано металографічний метод та метод комп'ютерної томографії. Проведені дослідження пористого матеріалу дозволили стверджувати про відмінності у структурі матеріалу та пористості в залежності від різних умов виготовлення зразків: температури та тривалості процесів, пропорції інгредієнтів. А це, в свою чергу, дозволило визначити технологічні параметри одержання пористої міді з пористістю до 65%, що уможливило її використання, як матриці провідного матеріалу – складової з вищою температурою плавлення. Підібрано оптимальний метод інфільтрації мідних зразків матеріалом з низькою температурою плавлення (легкоплавкою складовою).

Ключові слова: високоструміві апарати, електричні контакти, бездугова комутація, композитний матеріал, пористість, металографічний аналіз, комп'ютерна томографія, інфільтрація.

Подано до редакції 10.06.2024; прийнято до друку 19.11.2024.

Вступ

Традиційно основним компонентом для електричних контактів є срібло, але сучасні дослідження спрямовані на пошук альтернативних, недорогих матеріалів, що забезпечують кращу електродинамічну стійкість та менші втрати при комутації [1,2]. Порівняння різних матеріалів показує, що композитні матеріали, виготовлені методом порошкової металургії, можуть застосовуватися як контактні матеріали, що мають значні переваги завдяки своїм унікальним властивостям [3,4].

Контакти, виготовлені методами порошкової металургії, відрізняються кращими характеристиками

міцності й більш високими електроконтактними властивостями [5,6]. Це дозволило використовувати їх для виготовлення електричних контактів у високострумівих електричних апаратах [7].

Контакти з композитних матеріалів дозволяють забезпечувати надійну комутацію без утворення дуги, що є критично важливим для сучасних високоефективних вимикачів [2,8].

Багатоамперні автоматичні вимикачі виконують функції розподілу електроенергії в енергосистемі і забезпечують захист при виході апарату з ладу. Тому вони є важливими елементами в електроенергетиці.

У контактній системі багатоамперних вимикачів використовуються дугові і головні контакти, які

забезпечують поетапне роз'єднання електричного кола. Головні контакти забезпечують протікання номінального струму, струмів короткого замикання в селективній зоні спрацьовування вимикача і відключення струмів перевантаження. Дюгові контакти поглинають весь струм навантаження електричного кола при розмиканні контактів, що забезпечує дугову комутацію струмів з головними контактами [10,11].

Важливими параметрами автоматичного вимикача є електродинамічна стійкість, комутаційна здатність та максимальна комутаційна здатність забезпечення яких обумовлює масу і габарити самого вимикача.

Аналіз конструкції автоматичних вимикачів показав, що ці параметри, які значною мірою залежать один від одного, забезпечуються в основному конструктивними рішеннями – поділом контактів на дюгові та головні, з подальшим поділом головних контактів на паралельні групи, і забезпечення відповідного енергоспоживання механізму перемикання [12].

Застосування послідовно комутуваних головних і дюгових контактів дозволяє використовувати матеріали для головних контактів, які є більш стійкими до дуги і мають низький електричний опір. Як правило, такі матеріали мають не тільки високу електро- і теплопровідність, але і низьку твердість. Це дозволяє зменшити необхідні контактні тиски для досягнення високої електродинамічної стабільності, а також, зниження витрат матеріалу [13,14]. Водночас така контактна система накладає певні обмеження на конструкцію в цілому і на матеріали, що використовують для виготовлення контактів [6].

Розбиття головних контактів на паралельний ряд в одному полюсі дозволяє знизити необхідні сумарні контактні напруги при збереженні значень комутаційних струмів і електродинамічної стабільності. В автоматичних вимикачах змінного струму через ефект зміщення струму і ефекту близькості струми через паралельні контакти розподіляються нерівномірно – струм через крайні контакти в 1,4 - 1,6 рази більше, ніж через середні. Це, звичайно, призводить до зниження електродинамічної стійкості [15].

Зниженню електродинамічної стійкості також сприяє розкид значень перехідних контактних опорів, які збільшують нерівномірність значень струму, що протікає. Звідси виникає необхідність збільшення активного та індуктивного опорів і зменшення взаємної індуктивності, що суперечить основній меті – забезпеченню протікання струму з мінімальними втратами при зменшенні габаритів контактної системи [16].

Для підвищення ефективності роботи контактів і вимикача в цілому необхідно прагнути до зниження перехідного опору в зоні контакту і підвищення електродинамічної стійкості. Недотримання цих умов може призвести до неповного замикання контакту та виникнення аварійних ситуацій [2,8].

Для надійної роботи електричних пристроїв композитний матеріал сучасних контактів містить дорогі, дефіцитні та токсичні елементи і їх сполуки.

Найбільш поширені з них: паладій, платина, срібло, мідь, нікель, вольфрам, оксид кадмію, ртуть та інші [1,17].

Необхідність зменшення вмісту токсичних та дорогих складових у композитних матеріалах електричних контактів та зменшення габаритних розмірів апаратів в цілому надає актуальності питанню удосконалення, розробки та створення композитного матеріалу електричних контактів з особливими властивостями для високоамперних електричних апаратів з бездуговою комутацією [3,18].

Унікальність запропонованого композитного матеріалу полягає у створенні пористої матриці з матеріалу з високою температурою плавлення, яка просякнута наповнювачем, що має низьку температуру плавлення. Під дією джоулевого тепла наповнювач переходить спочатку у напіврідкий, а потім у рідкий стан, що приводить у робочий стан електричні контакти, як рідкометалеві [7,19]. Електроконтактні композити, виготовлені за цією спеціальною технологією, практично не містять дорогих і токсичних елементів, мають низький опір передачі в зоні контакту і високу комутаційну здатність. Завдяки можливості зміни агрегатного стану такого композитного матеріалу та зміною легкоплавкої складової можна досягти зміни їх властивостей у необхідному діапазоні [21].

Отже, проведення дослідження пористого мідного матеріалу, як матриці для легкоплавкої складової, підбір оптимального складу та пропорцій складових при створенні пористої міді в залежності від різних умов виготовлення зразків: температури та тривалості перебігу процесів та ін.. є важливим завданням [22].

I. Експеримент

1.1. Досліджувані зразки

Виготовлення зразків проведено за традиційною методикою порошкової металургії – шляхом пресування та спікання порошкового матеріалу (рис. 1).

В якості основних матеріалів для їх виготовлення використано мідний порошок Sigma-Aldrich, характеристики якого наведені в таблиці 1, та порошок пороутворювача Sigma-Aldrich.

На першому етапі виготовлення зразка до порошку міді додавали порошок пороутворювача Sigma-Aldrich. Порошок пороутворювача змішували з порошками міді як сполучну речовину та для створення певних рівнів пористості в матеріалі. Кількість пороутворювача та основного матеріалу підбирали дослідним шляхом.

Порошкову суміш пресували при різних тисках від 1 до 5т, з кроком в 0,5т. Діапазон тисків визначали попередніми експериментальними дослідженнями [23].

Зразки спікали в атмосфері водню, щоб уникнути окислення та забруднення. Швидкість потоку водню підтримувалася постійною на рівні 500 см³/хв з тиском подачі 1 бар під час спікання. Спікання проводили протягом однієї години при трьох різних температурах спікання, 800°C, 850°C і 900°C [24]. Час

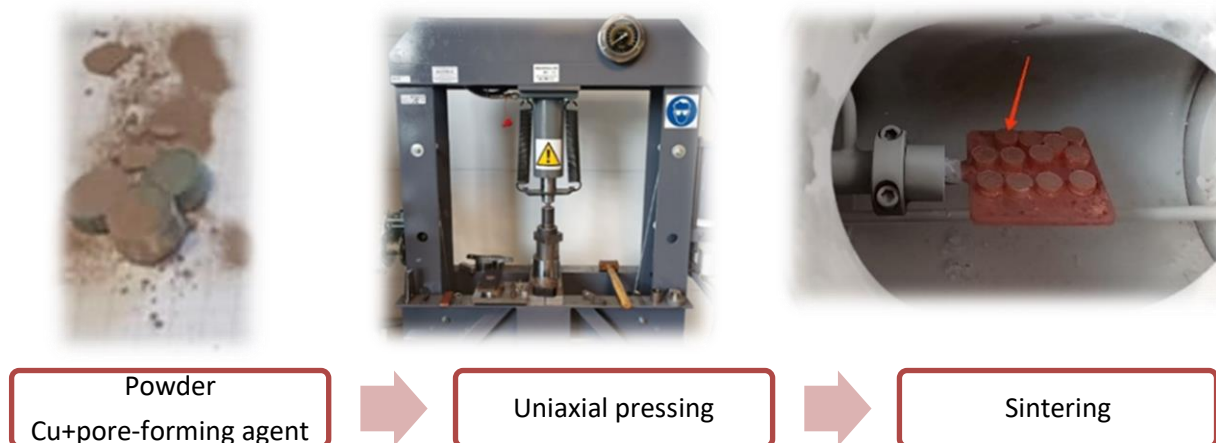


Рис. 1. Основні етапи виготовлення зразків.

Таблиця 1.

Фізичні властивості порошку міді				
Powder	Particle Size (μm)	Purity (%)	Melting/Boiling Point ($^{\circ}\text{C}$)	Density (g/cm^3)
Cu	≤ 200	99,8	1083/2597	8,96

нагрівання зразка становив $5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Охолодження зразків проводили за допомогою печі. Спінання при такій високій температурі викликало випаровування пороутворювача із зразків, що сприяло утворенню пор.

1.2. Методика визначення фізичних властивостей зразків

Дослідження фізичних властивостей отриманих зразків проводилося у кілька етапів:

- оцінювання густини;
- дослідження мікротвердості за Віккерсом;
- визначення пористості.

Оцінювання густих характеристик зразків проведено за допомогою денситометричного методу [25], з використанням лабораторних аналітичних ваг Radwag Type AS310/X (точність $\pm 0,1$ мг). Розрахунки значень густини виконувались згідно з формулою 1. Для підвищення точності визначення густини кожен розрахунок виконано на основі трьох зважувань зразків у відповідних середовищах.

$$\rho_c = \frac{m_p}{m_p - m_c} (\rho_w - \rho_p) + \rho_p \quad (1)$$

де: ρ_c – густина зразка [$\text{г}/\text{см}^3$]; m_p – маса зразка виміряна в повітрі [г]; m_c – маса зразка, виміряна у воді [г]; ρ_w – $0,998203 \text{ г}/\text{см}^3$ густина води при $T=20 \pm 1^{\circ}\text{C}$; ρ_p – $0,001205 \text{ г}/\text{см}^3$ густина повітря при $T=20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

На етапі досліджень мікротвердості за Віккерсом використано твердомір FM-ARS 9000 з навантаженням на індентер 10 гс і тривалістю повного силового навантаження 15 секунд [7,13]. Вимірювання мікротвердості проведено на заздалегідь виготовлених поперечних зрізах зразків. Загалом, значення мікротвердості визначено на 20 рандомнообраних ділянках 5 зрізів [26].

Заключний етап визначення фізичних властивостей передбачав проведення:

- теоретичних розрахунків загальної пористості зразків за формулою (2) [5]:

$$P = 1 - \frac{\rho_c}{\rho} \cdot 100\%, \quad (2)$$

- де ρ – густина без пор [$\text{г}/\text{см}^3$].
- томографічних досліджень за допомогою томографа Nikon ST H 225ST 2X.

- лабораторних стереологічних досліджень за допомогою оптичного мікроскопа марки ZEISS Axio Imager [16] і комп'ютерної системи аналізу зображень AxioVision, що дає можливість аналізувати пористі структури в інтервалі розмірів пор недоступному для дослідження іншими методами.

Для проведення томографічних досліджень необхідно щоб зразок був сухим та ретельно очищеним від пилу. Розміри і форма зразка повинні бути підібрані таким чином щоб зразок міг вільно поміститися у камері томографа та не рухався у процесі сканування. Недотримання вказаних вимог може призвести до появи артефактів та «розмитого» зображення.

Отриману за допомогою томографа серію 2D рентгенівських знімків використано для реконструкції тривимірної моделі та проведення детального аналізу густини, форми, геометричних характеристик пор; структурних дефектів та інших фізичних властивостей зразка [6,25].

Отримані зображення за допомогою мікроскопа та системи аналізу використано для проведення стереологічного аналізу структури зразка, оцінки розподілу пор, їхньої форми та геометричних характеристик, а також для виявлення структурних дефектів та визначення інших фізичних властивостей матеріалу [15].

II. Результати та обговорення

Для визначення оптимального співвідношення компонентів для створення необхідної штучної пористості мідного зразка проводили експерименти з

додаванням пороутворювача до міді в діапазоні від 10% до 35% за масою. Аналіз отриманих структур показав, що при співвідношенні 75% Cu і 25% пороутворювача досягається оптимальний розподіл пор, які мають відносно рівномірний розмір і розташування. Зразки були піддані пресуванню з подальшим спіканням для випаровування (видалення) пороутворювача, після чого проводився аналіз пористості за допомогою комп'ютерної томографії та мікроскопії.

Перед спіканням густина зразків є різною за значеннями, залежно від прикладеного тиску під час пресування. При низьких навантаженнях (1-2,5 т/см²) густина менша, тоді як при 3-5 т/см² вона зростає, досягаючи максимальних значень.

Після спікання густина у всіх зразках знижується, що свідчить про зростання пористості матеріалу в результаті видалення пороутворювача. Це зниження є очікуваним, оскільки протягом спікання утворюються пори, які знижують загальну густина.

Зразки, спресовані при 3-5 т/см², показують найбільш стабільне значення густини до і після спікання. Це вказує на те, що цей діапазон навантаження є оптимальним для пресування, щоб забезпечити стабільність структури матеріалу.

У випадку навантаження 1-2,5 т/см² густина після спікання має більші варіації, що може вказувати на недостатню або надмірну компактність.

Зразки мають вищу густина до процесу спікання при тиску 3-5 т/см² ніж за інших значеннях тиску, що підтверджує доцільність використання цього навантаження для досягнення високої густини.

Після спікання зразки з 3-5 т/см² показують зниження густини, але воно є стабільним і прогнозованим, що робить цей параметр придатним для забезпечення відтворюваності результатів.

Отже, за результатами дослідження густини можна стверджувати, що тиск від 3 до 5 т/см² забезпечує найкраще співвідношення між компактністю структури до спікання та її стабільністю після спікання. З цього можна зробити висновок, що такий тиск є оптимальний для створення пористої структури з передбачуваними характеристиками густини, що важливо для подальшого використання матеріалу в композитах.

Значення твердості за шкалою Віккерса підтверджують, що більші значення густини зразків до спікання відповідають вищій мікротвердості. У зразках із високою початковою густиною спостерігається вища міцність і менша пористість, що загалом сприяє підвищенню мікротвердості в отриманих структурах. У випадку, коли густина перед спіканням варіюється в діапазоні від 4.5 до 5.0 г/см³, значення мікротвердості досягають максимальної позначки у межах 160-170 HV. Натомість зразки з нижчою густиною до спікання, в межах 3.5-4.0 г/см³, мають твердість на рівні 90-100 HV, що підтверджує важливість оптимального підбору густини для досягнення необхідних механічних властивостей.

Після спікання в усіх зразках спостерігається зниження густини, що свідчить про збільшення пористості матеріалу. Це очікуване явище, оскільки видалення пороутворювача призводить до

формування пор у структурі. Значення мікротвердості після спікання показують, що зразки з вищим рівнем пористості мають тенденцію до нижчих показників твердості. У зразках, де пористість є високою, твердість знижується до 110-120 HV, тоді як менш пористі зразки демонструють значення твердості у межах 140-150 HV.

Пресування при тиску від 3 до 5 т/см² забезпечує стабільніші значення густини як до, так і після спікання, що дозволяє досягти рівномірного розподілу мікротвердості. Зразки, виготовлені при такому діапазоні тиску, демонструють надійні механічні характеристики та відносно стабільні значення мікротвердості як до, так і після спікання. Це робить таке навантаження оптимальним для таких випадків, де важлива стабільна міцність і відтворюваність результатів.

Проведений аналіз пористості мідних зразків за допомогою комп'ютерної томографії дозволив отримати важливі характеристики структури простору пор. Загальний об'єм пор у зразку становить приблизно 52,36 мм³. Середній об'єм пори складає 0,00328 мм³ [5,25], що свідчить про наявність як малих, так і великих пор [12,13].

Гістограма (рис.2) демонструє частоту пор різного об'єму, підкреслюючи переважання малих пор і незначну кількість великих пор.

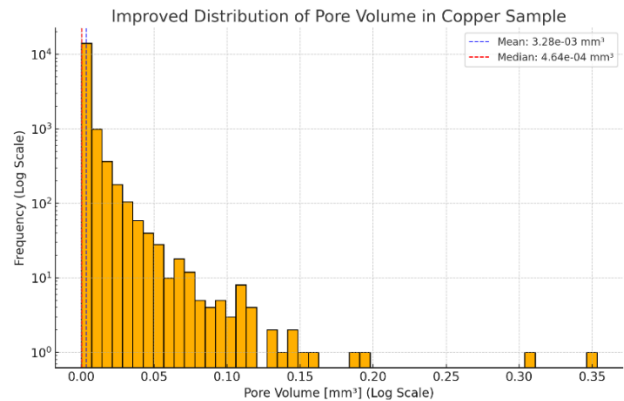


Рис. 2. Гістограма розподілу об'єму пор у зразку міді.

Для побудови графіку використано логарифмічну шкалу, що дозволяє краще відобразити як великі, так і малі пори [6,14]. Додані лінії для середнього та медіанного значень (синя і червона лінії відповідно) допомагають візуально оцінити основні статистичні показники розподілу.

Пори характеризуються нерегулярною формою, про що свідчить середнє значення сферичності 0,528 та компактності 0,278. Ці показники вказують на відхилення від ідеальної сферичної форми, особливо для великих пор, які мають тенденцію до більш витягнутої форми [2].

Розподіл компактності (рис. 3) відображає різноманітність форм пор від більш витягнутих до компактних, причому більшість значень знаходяться в нижній частині шкали, що свідчить про наявність витягнутих форм [3,19].

Розподіл сферичності (рис.4) показує, що більшість пор мають значення сферичності нижче 1,

що означає, що пори є переважно нерегулярними, з деякою схильністю до округлих форм.

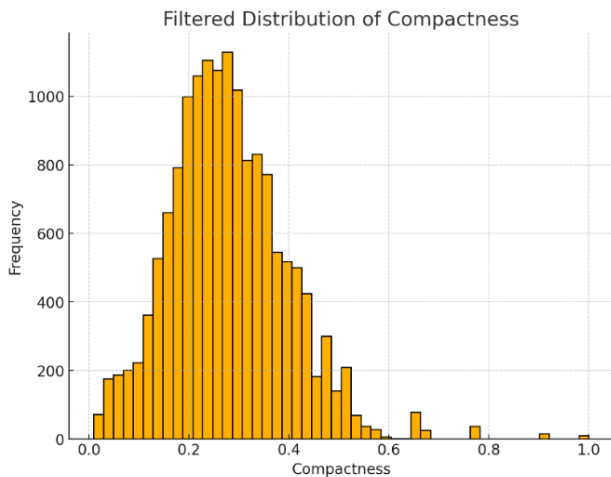


Рис. 3. Розподіл компактності.

Більшість пор мають значення сферичності від 0,47 до 0,59, що свідчить про переважну нерегулярність форми. Також було виявлено слабкий зворотний зв'язок між об'ємом та сферичністю пор, що вказує на тенденцію великих пор до меншої сферичності та більш витягнутої форми [15].

Комп'ютерна томографія дозволила також провести тривимірну реконструкцію зразка, що надало можливість оцінити розподіл пор у просторі. Проектовані площі та розміри уздовж осей x, y та z показали варіативність форм у тривимірному просторі, де середній розмір пори уздовж осі x становить 0,158 мм, уздовж y - 0,132 мм, а уздовж z - 0,139 мм [26].

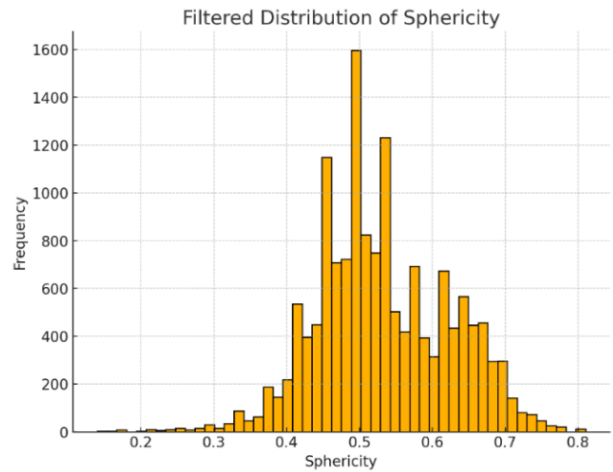


Рис. 4. Розподіл сферичності.

На рис.5. представлено тривимірний аналіз пористості мідного зразка, виконаний за допомогою комп'ютерної томографії. Різнокольорові пори на верхніх зображеннях ідентифіковані за розмірами, де великі пори позначені червоним, а менші – синім та зеленим [16,18]. Це дозволяє візуально оцінити варіативність розмірів та форм пор. Нижнє праве зображення демонструє тривимірну реконструкцію пористої структури зразка, що дає можливість дослідити розподіл пор у просторі та визначити взаємне розташування порожнин.

Провівши аналіз кореляційної матриці характеристик пор у зразку пористої міді (рис. 6) можна стверджувати, що об'єм пори демонструє високу позитивну кореляцію з такими характеристиками, як еквівалентний діаметр, площа поверхні та кількість вокселів [2,27]. Це свідчить про те, що більші пори зазвичай мають більший діаметр, площу поверхні та велику кількість вокселів, що

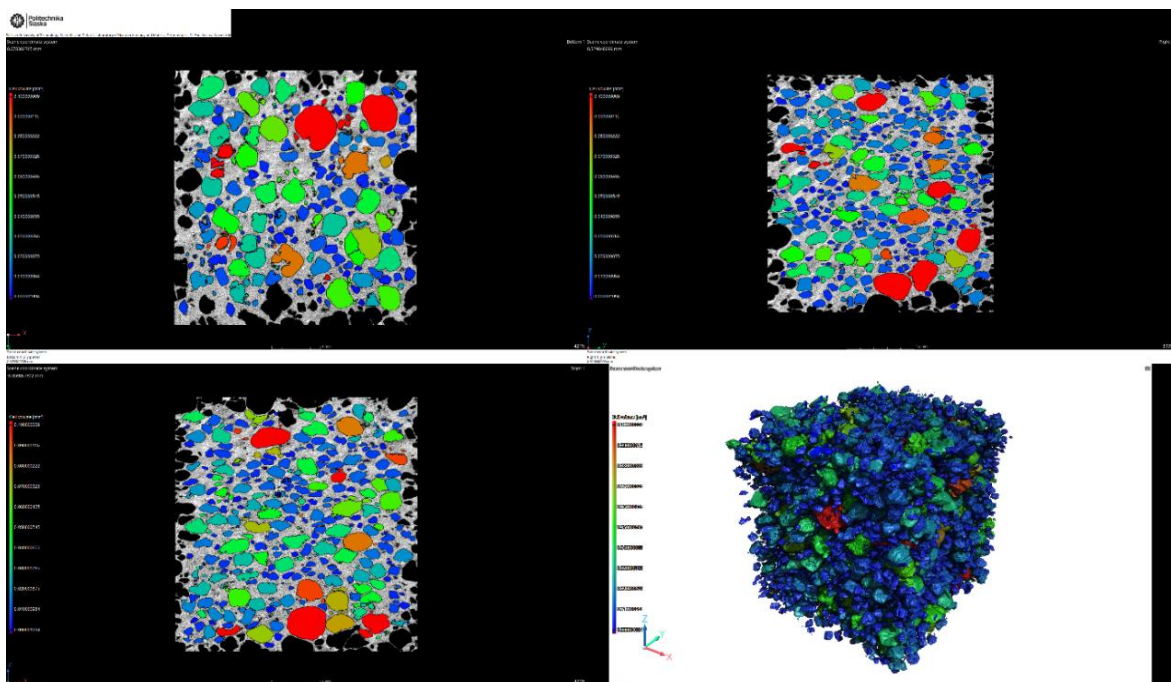


Рис. 5. Тривимірна реконструкція пористої структури мідного зразка за результатами комп'ютерної томографії.

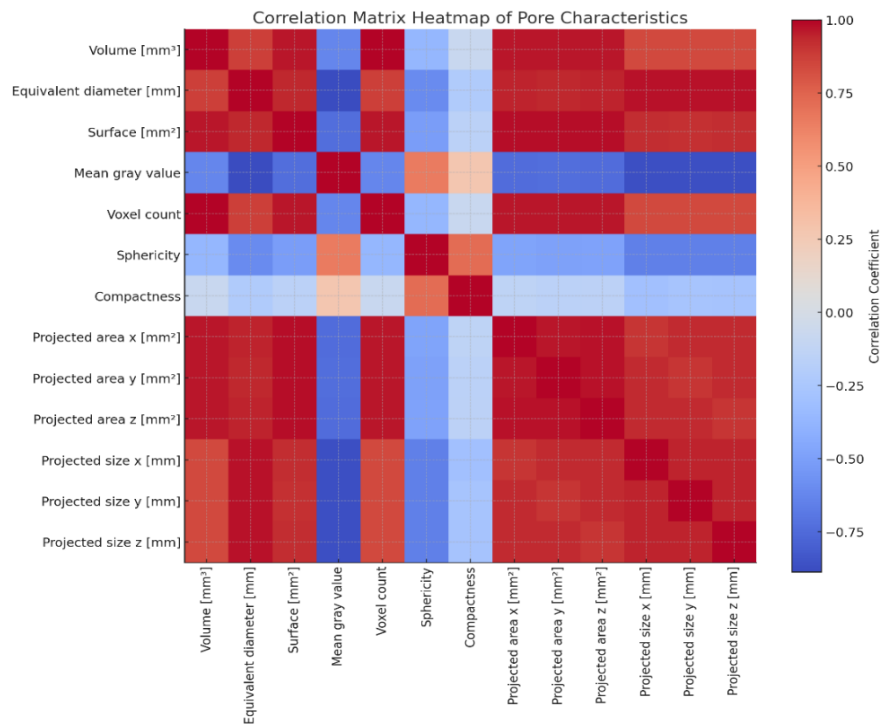


Рис. 6. Кореляційна матриця характеристики пор у зразку з пористої міді.

логічно узгоджується з їх більшим об'ємом. Еквівалентний діаметр також сильно корелює з площею поверхні, що вказує на прямий зв'язок між розміром пори та її поверхнею. Сферичність має слабкі кореляції з більшістю інших параметрів, крім компактності, з якою вона демонструє помірну негативну кореляцію [20]. Це вказує на те, що більш сферичні пори є менш витягнутими або компактними, що підтверджує їхню тенденцію до округлої форми. Компактність, в свою чергу, показує слабкий зворотний зв'язок з об'ємом та поверхнею, що свідчить про те, що витягнуті форми пор мають менший об'єм або площу поверхні. Проектовані площі та розміри вздовж осей x , y і z демонструють помірні кореляції з об'ємом, еквівалентним діаметром і площею поверхні [28]. Це свідчить про те, що тривимірна форма пор частково визначає їхній об'єм та розмір.

Отже, кореляційна матриця доводить, що розмір і форма пор у зразку пористої міді не є випадковими величинами, а взаємопов'язані через конкретні геометричні характеристики [6,19]. Це підтверджує, що більші пори мають тенденцію до більшої площі поверхні та об'єму, а також до витягнутої форми, тоді як пори з високою сферичністю є більш округлими.

Графік (рис. 7) показує зв'язок між компактністю та сферичністю пор у зразку. Загалом можна спостерігати тенденцію до зворотного зв'язку: пори з високою компактністю мають нижчу сферичність, що свідчить про їхню більш витягнуту або нерегулярну форму [26]. Пори з високою сферичністю наближаються до кулястої форми, але зазвичай мають нижчі значення компактності, що вказує на їх округлість.

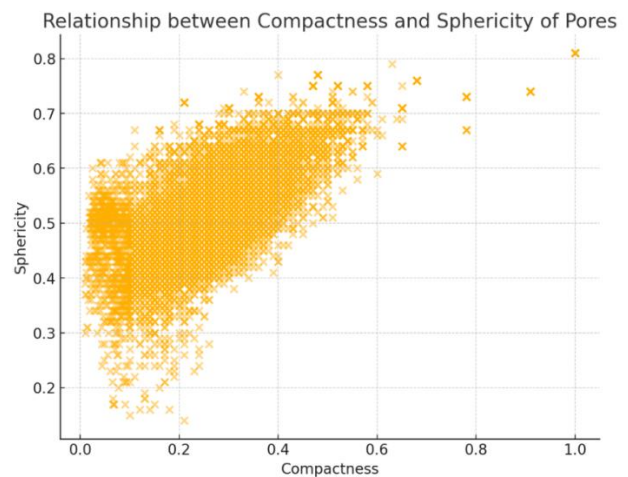


Рис. 7. Зв'язок між компактністю та сферичністю пор.

Цей аналіз підтверджує, що показники компактності та сферичності взаємодоповнюють один одного при оцінці форми пор, де більш сферичні пори є менш компактними, а більш витягнуті – більш компактними.

Дослідження мікрошліфів мідного зразка під мікроскопом дозволяє доповнити результати комп'ютерної томографії, надаючи детальне зображення структури пор на поверхневому рівні [15,27]. На мікрофотографії (рис. 8) видно пори різних розмірів і форм, що рівномірно розподілені по матриці. Темні області – це пори, тоді як світлі ділянки – це мідна матриця.

Видно, що більші пори мають нерегулярну форму, а менші – ближчі до сферичної. Така морфологія пор підтверджує результати, отримані за допомогою комп'ютерної томографії, що також вказували на нерегулярну форму більш великих пор та переважання невеликих округлих пор.

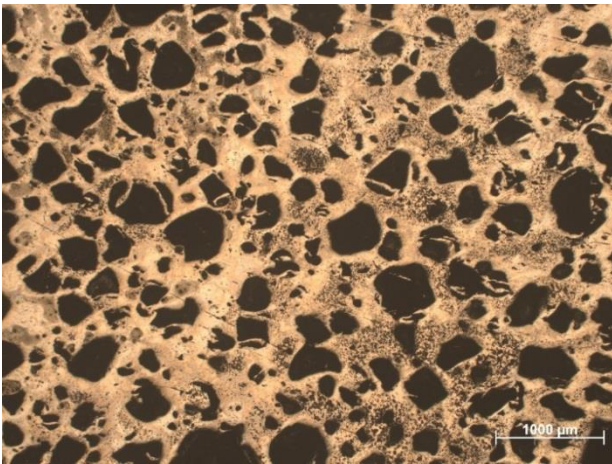


Рис. 8. Мікроструктура пористого зразка міді.

На мікрофотографії показано рівномірний розподіл пор різних форм і розмірів у мідній матриці, що підтверджує наявність значної пористості [4,16].

Поєднання результатів мікроскопії та комп'ютерної томографії дозволяє отримати цілісну картину структури пористого зразка. Комп'ютерна томографія забезпечує тривимірне уявлення пористості, демонструючи розподіл об'єму та форму пор у всьому об'ємі зразка [18]. У той же час, мікрофотографії мікрошліфів надають високодеталізоване зображення пор на рівні поверхні, дозволяючи оцінити морфологічні особливості пор, такі як їхні краї та геометрію.

Видно, що структура пор у мідній матриці є достатньо однорідною по всьому об'єму зразка та містить численні пори з нерегулярною формою. Це є важливою характеристикою для використання таких матеріалів у композитах, оскільки висока пористість та різноманітність форм пор дозволяють легко проводити подальшу інфільтрацію матеріалами з низькою температурою плавлення.

Висновки

Проведене дослідження пористої структури мідних зразків, виготовлених методом порошкової металургії, дозволило отримати детальну характеристику структури матеріалу, який можна використовувати як матрицю для електричних контактів у високоамперних електричних апаратах. Завдяки використанню комп'ютерної томографії та мікроструктурного аналізу мікрошліфів, вдалося виявити особливості пористої структури зразків на поверхневому та об'ємному рівнях.

Комп'ютерна томографія надала можливість оцінити загальний об'єм пор у зразку, який становить $52,36 \text{ мм}^3$. Було також встановлено, що середній об'єм пори становить $0,00328 \text{ мм}^3$, а форма пор є здебільшого нерегулярною, з середнім значенням сферичності $0,528$. Це свідчить про переважання

втягнутих та нерівних форм, особливо для великих пор, що було додатково підтверджено розподілом компактності та сферичності.

Порівняльний аналіз результатів комп'ютерної томографії та мікрофотографій показав, що структура пористої мідної матриці є однорідною та містить численні пори з різними формами і розмірами. Мікрофотографії підтвердили, що більші пори мають нерегулярну форму, а дрібніші – ближчі до сферичної, що узгоджується з тривимірними даними томографії.

Отримані результати дозволили встановити оптимальні технологічні параметри для виготовлення пористої міді з необхідною пористістю. Така структура є перспективною для застосування як матриця для легкоплавкої складової, що може значно покращити теплопровідність та знизити електричний опір у зоні контакту, а також підвищити електродинамічну стійкість контактної системи.

Розроблений матеріал та технологія його виготовлення пропонують економічно вигідну альтернативу традиційним контактним матеріалам, оскільки дозволяють замінити дорогі та дефіцитні матеріали, такі як срібло, платина та інші. Композит на основі пористої міді, просякнутий легкоплавким матеріалом, має потенціал для застосування у високоамперних вимикачах та інших електричних апаратах, де важливі низький перехідний опір, висока теплопровідність та здатність до ефективної комутації без утворення дуги.

Таким чином, поєднання методів комп'ютерної томографії та мікроструктурного аналізу мікрошліфів дало змогу детально вивчити структуру та властивості пористого мідного матеріалу, що є важливим кроком у розробці інноваційних матеріалів для електротехнічних застосувань.

Габльовська Надія – к.т.н., доцент кафедри електроенергетики електротехніки та електромеханіки;
Павленко Тетяна - доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики електротехніки та електромеханіки;
Клоц-Пташина Анна – доктор філософії, кафедра інженерії та біомедичних матеріалів, факультет інженерії машинобудування;
Кжемінські Лукаш – PhD, Науково-навчальна лабораторія нанотехнологій і технологій матеріалів – RMT-L2, Факультет машинобудування; науково-освітньої лабораторії нанотехнологій і матеріальних технологій факультету машинобудування;
Лукович Даріуш – доктор філософії, лабораторія дослідження матеріалів, факультет інженерії машинобудування;
Кононенко Марина – к.т.н., доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки;
Габльовський Богдан – кандидат геологічних наук, доцент кафедри нафтогазової геофізики;.

[1] A. Chen, B. Li, C. Zhang, *Innovative design of porous materials for advanced thermal management*, Sustainable Materials and Technologies, 36, 110562 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110562>.

- [2] S.Y. Tarasov, A.A. Kudryavtsev, *Microstructure and Properties of Composite Materials in High-Current Electrical Contacts*, *Materials Today: Proceedings*, 4(3), 2820 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.160>.
- [3] Y. Cao, X. Jiang, *Powder Metallurgy Processing of Copper and Copper-Based Materials*, *Materials Science Forum*, 959, 17 (2019); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.959.17>.
- [4] F. Wan, T.J. Pizada, R. Liu, Y. Wang, C. Zhang, & T.J. Marrow, *Microstructure Characterization by X-Ray Computed Tomography of C/C-SiC Ceramic Composites Fabricated with Different Carbon Fiber Architectures*, *Applied Composite Materials*, 26, 1247; <https://doi.org/10.1007/s10443-019-09778-2>.
- [5] T.M. Mazur, M.M. Slyotov, M.P. Mazur, V.V. Prokopiv, O.I. Kinzerska, O.M. Slyotov, *Features of the cadmium chalcogenide substrates with surface nanostructure*, *Materials Today: Proceedings*, 35(4), 661 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.112>.
- [6] S. Khademzadeh, S. Carmignato, N. Parvin, F. Zanini, P. F. Bariani, *Micro porosity analysis in additive manufactured NiTi parts using micro computed tomography and electron microscopy*, *Materials and Design*, 90, 745 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.161>.
- [7] M.M. Slyotov, T.M. Mazur, V.V. Prokopiv, O.M. Slyotov, M.P. Mazur, *Sources of optical radiation based on ZnTe/ZnSe/ZnS heterostructures*, *Materials Today: Proceedings*, 62, 5763, (2022); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.476>.
- [8] S. Hong, J. Kim, *The Role of Sintering Additives in the Sintering of Copper and Its Alloys*, *Acta Materialia*, 54(2), 301 (2006); <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.015>.
- [9] R. Cavuoto, P. Lenarda, A. Tampieri, D. Bigoni, & M. Paggi, *Phase-field modelling of failure in ceramics with multiscale porosity*. *Materials & Design*, 238, 112708 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112708>.
- [10] J. Čapek, D. Vojtěch, *Properties of porous magnesium prepared by powder metallurgy*, *Materials Science and Engineering C*, 33(1), 564 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.10.002>.
- [11] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, *Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting*, *Additive Manufacturing*, 1(4), 77 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>.
- [12] M. Elangovan, S. Gowri, N. Velmurugan, *Investigating the morphology, hardness, and porosity of copper filters produced via hydraulic pressing*, *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 208 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.012>.
- [13] T.M. Mazur, V.V. Prokopiv, M.M. Slyotov, M.P. Mazur, O.V. Kinzerska, O.M. Slyotov, *Optical properties of CdTe doped Ca*, *Physics and chemistry of solid state*, 21(1), 52 (2020); <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.52-56>.
- [14] V. S. Seesala, R. Rajasekaran, A. Dutta, P. V. Vaidya, S. Dhara, *Dense-porous multilayer ceramics by green shaping and salt leaching*, *Open Ceramics*, 5, 100084 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100084>.
- [15] A. Hedayati, M. Heshmati, H. Faghieh Shojaei, M. Salimi, *Optimization of porosity and permeability in metal foams using a combined experimental and numerical approach*, *Powder Technology*, 392, 229 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.009>.
- [16] E.M. Kiass, K. Zarbane, Z. Beidouri, *Process parameters effect on porosity rate of AlSi₁₀Mg parts additively manufactured by Selective Laser Melting: challenges and research opportunities*, *Archives of Materials Science and Engineering*, 122(1), 22 (2023); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.8844>.
- [17] A.Y. Al-Maharma, S.P. Patil, B. Markert, *Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review*, *Materials Research Express*, 7, 122001 (2020); <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abcc5d>.
- [18] W. Sun, S. B. Brown, R. K. Leach, *An overview of industrial X-ray computed tomography*, *NPL Report ENG 32*, National Physical Laboratory, January (2012).
- [19] A. J. Kinloch, R. J. Young, *Fracture Behavior of Polymers*, Applied Science Publishers (1983).
- [20] Z. Fan, B. Zhang, Y. Liu, T. Suo, P. Xu, J. Zhang, *Interpenetrating phase composite foam based on porous aluminum skeleton for high energy absorption*, *Polymer Testing*, 93, 106917 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106917>.
- [21] C. Hall, *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, (McGraw-Hill Education, 1994).
- [22] M. Sinico, S. D. Jadhav, A. Witvrouw, K. Vanmeensel, W. Dewulf, *A Micro-Computed Tomography Comparison of the Porosity in Additively Fabricated CuCrI Alloy Parts Using Virgin and Surface-Modified Powders*, *Materials*, 14(8), 1995 (2021); <https://doi.org/10.3390/ma14081995>.
- [23] Pavlenko, T., Hablovska, N., & Shyndak, L. *Analysis of the possibility of using pseudo-liquid metal contacts in electrical devices*. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 64 (2023); <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.06>.
- [24] N. Hablovska, T. Pavlenko, G. Matula, D. Lukowicz, A. Kloc-Ptaszna, Ł. Krzemiński, *Studies on the porosity of copper used as a matrix for conductive composite for high-current circuit breakers with arc-free switching*, *Perspectives of Development in Engineering Sciences – Trends, Innovations and Challenges*, Vol. 2, TYGIEL Scientific Publishing House, Lublin, 74 (2024); <https://bc.wydawnictwo-tygiel.pl/publikacja/35E7EC54-B2A8-0E00-DFBE-3F20777FE701>.
- [25] A.N.S. Appiah, A. Woźniak, P. Snopiński, K. Matus, P.M. Nuckowski, G.F. Batalha, S.A. Nazarov, I.N. Ganiev, M. Adamiak, *Vanadium-induced structural effects on the corrosion and tribological properties of an Al-Li binary alloy*, *Journal of Alloys and Compounds*, 973, 172910 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172910>.

- [26] C. Kamath, B. El-Dasher, G.F. Gallegos, W.E. King, A. Sisto, *Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74, 65 (2014); <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5954-9>.
- [27] R. Liu, S. Liu, X. Zhang, *A physics-informed machine learning model for porosity analysis in laser powder bed fusion additive manufacturing*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113, 1943 (2021); <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06640-3>.
- [28] [C.L. Reedy, C.L. Reedy, *High-resolution micro-CT with 3D image analysis for porosity characterization of historic bricks*, Heritage Science, 10, 83 (2022); <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00723-4>.

Nadiia Hablovska¹, Tetiana Pavlenko¹, Anna Kloc-Ptaszna², Łukasz Krzemiński²,
Grzegorz Matula², Dariusz Łukowiec², Maryna Kononenko¹, Bohdan Hablovskyi¹

Synthesis of components for composite material of electrical contacts with unique properties for high-current electrical apparatus with arc-free switching

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, nadiia.hablovska@nung.edu.ua*
²*Silesian University of Technology, Poland, Anna.Kloc-Ptaszna@polsl.pl*

Experimental research has determined the optimal composition of components for a composite material used in electrical contacts with unique properties designed for high-current electrical apparatus that perform switching without arc formation. This article presents the results of a study on the porosity of copper obtained by the powder metallurgy method. To analyze the porosity of copper, methods for studying porous structures on both the surface and within the sample were examined. The metallographic method and the method of computed tomography were selected as the most suitable and informative. The conducted studies of the porous material revealed differences in material structure and porosity depending on various manufacturing conditions: temperature, process duration, and ingredient proportions. This, in turn, allowed for the identification of technological parameters for obtaining porous copper with up to 65% porosity, enabling its use as a matrix of the conductive material with a higher melting temperature. The optimal method for infiltrating copper samples with a low-melting material (fusible component) was selected.

Keywords: high-current apparatus, electrical contacts, arc-free switching, composite material, porosity, metallographic analysis, computer tomography, infiltration.