

© З.В. Сазанішвілі<sup>1</sup>, Н.О. Ротт<sup>1</sup>, І.М. Мацюк<sup>1</sup>, Д.О. Довгаль<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ІНТЕГРАЦІЯ ДИЗАЙН-МИСЛЕННЯ В РОЗРОБКУ ПРОЄКТУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ

Z. Sazanishvili<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4138-9238>

N. Rott<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3839-6405>

I. Matsiuk<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0861-0933>

D. Dovgal<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1448-4152>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## INTEGRATION OF DESIGN THINKING INTO THE DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT COPPER-BASED MATERIALS

**Мета.** Розробити інноваційний енергоефективний мідний матеріал із покращеними фізичними властивостями, що забезпечує довговічність, економічну ефективність та екологічну безпеку.

**Методика.** Запропонована методика поєднує фізико-хімічний аналіз і цикл дизайн-мислення для створення та оптимізації мідного композиційного матеріалу. Контроль технологічних параметрів забезпечує керування структурою й властивостями, а ітеративні етапи дизайн-мислення дозволяють адаптувати рішення до потреб користувачів. Зворотний зв'язок і випробування коригують матеріал і технологію, підвищуючи якість та функціональність продукту.

**Результати.** Розроблено модель комплексної оцінки технічних та експлуатаційних характеристик енергоефективного матеріалу на основі міді з врахуванням ключових параметрів – теплопровідності, електропровідності, корозійної стійкості та довговічності. Оцінка включає аналіз відгуків потенційних користувачів, що забезпечує адаптивність матеріалу до потреб ринку і конкретних застосувань. Запропонований підхід поєднує якісне прогнозування і кількісне визначення параметрів, що сприяє створенню матеріалу з високою практичною цінністю та промисловою придатністю.

**Наукова новизна.** Вперше застосовано ітеративний підхід дизайн-мислення для розробки матеріалів на основі міді, який комплексно інтегрує технічні, експлуатаційні та користувацькі вимоги у процес створення композиційного порошкового матеріалу. Розроблено модель, що поєднує фізико-хімічні характеристики, параметри технології порошкової металургії та зворотний зв'язок від користувачів, що забезпечує адаптивність і високу практичну цінність матеріалу у реальних умовах застосування.

**Практична значимість.** Запропонована технологія порошкової металургії з контролем параметрів забезпечує матеріал з оптимізованими властивостями. Дизайн-мислення враховує потреби користувачів та умови експлуатації, підвищуючи якість і конкурентоспроможність продукту. Результати можуть бути впроваджені у виробництво для зниження енергоспоживання та витрат, що сприяє розвитку прикладного матеріалознавства і сталих технологій.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, мідь, дизайн-мислення, фізичні властивості, енергоефективні матеріали, інноваційні матеріали.

**Вступ.** У сучасних умовах глобальної зміни клімату, зростаючого рівня урбанізації та посилення конкуренції у світовій енергетиці, проблема підвищення енергоефективності стала одним із найважливіших напрямів наукових досліджень і промислових інновацій. Енергоефективні матеріали займають центральне місце у стратегіях зменшення споживання енергії та скорочення викидів парникових газів, що безпосередньо впливає на екологічну безпеку планети. Особливий інтерес становлять матеріали на основі міді [1–3], які поєднують у собі високі показники теплопровідності та електропровідності, що робить їх незамінними в широкому спектрі застосувань – від електроніки та телекомунікацій до промислових теплообмінників і систем відновлюваної енергетики [4]. Висока теплопровідність міді і її електрична провідність створюють умови для максимального ефективного перенесення тепла та електрики, що суттєво покращує роботу багатьох технологічних процесів.

Проте, традиційні підходи до розробки матеріалів часто сфокусовані на оптимізації обмеженого набору фізико-хімічних властивостей, ігноруючи при цьому комплексні потреби кінцевих користувачів, виробничі умови та екологічні аспекти, що у підсумку може обмежити впровадження нових технологій у промисловість [5]. Такі підходи проявляють свою слабкість особливо в умовах високої конкуренції на ринку та вимог до сталого розвитку. Наприклад, покращення лише однієї характеристики, такої як теплопровідність, без врахування довговічності матеріалу чи вартості впровадження може призвести до появи продуктів, які технічно досконалі, але не конкурентоспроможні або важкі для інтеграції у вже існуючі виробничі системи.

У цьому контексті дизайн-мислення стає інструментом, який дозволяє інженерам і науковцям переосмислити процес розробки, зміщуючи фокус зі суто технічних характеристик на реальні потреби користувачів і умови застосування. Цей ітеративний, орієнтований на користувача підхід включає етапи емпатії, визначення проблеми, генерації ідей, створення прототипів і тестування, що допомагає створювати інноваційні продукти, максимально адаптовані до ринкових вимог [6, 7]. Особливо актуальним цей підхід є для складних, багатофакторних завдань, де потрібно враховувати технічні, економічні, соціальні та екологічні аспекти одночасно [8].

Дослідження показали, що інтеграція принципів дизайн-мислення у розробку технічних рішень сприяє більш комплексному розгляду інтерфейсів між технологією та користувачем, що суттєво підвищує можливість успішного впровадження інновацій. Однак у сфері створення енергоефективних матеріалів на основі міді ця методологія поки що не отримала достатньої уваги, залишаючи відкритими перспективи для розвитку нових наукових підходів та практичних рішень.

Дана робота спрямована на поєднання традиційних науково-технічних методів (порошкова металургія, фізико-хімічний аналіз) із підходами дизайн-мислення для створення нового енергоефективного матеріалу на основі міді, який максимально відповідатиме не лише технічним стандартам, але й реальним очі-

куванням та вимогам користувачів і ринку. Особливий акцент зроблений на врахуванні комплексних експлуатаційних умов, пов'язаних із температурними коливаннями, впливом агресивних середовищ, а також економічними факторами, що визначають масштабованість і комерціалізацію розробки.

Виконане дослідження має на меті підвищити рівень співпраці між матеріалознавцями, інженерами і користувачами, а також оптимізувати методологію розробки, що призведе до появи більш дієвих і рентабельних рішень у сфері енергоефективних матеріалів на основі міді. Цей підхід, як очікується, покращить не лише якість і ефективність матеріалів, але й сприятиме впровадженню інноваційних продуктів у промисловість, що особливо важливо у глобальній боротьбі за сталий розвиток і зниження негативного впливу виробництва на довкілля.

**Основна частина.** Дослідження виконано у кілька етапів. Спершу проведено аналіз традиційних мідних матеріалів із енергоефективними властивостями за електро- та теплопровідністю, механічними властивостями, корозійною стійкістю (табл. 1).

Таблиця 1

Властивості традиційних мідних матеріалів

Властивість	Чиста мідь	Латунь (Cu-Zn, ~30% Zn)	Бронза (Cu-Sn, ~10% Sn)
Електропровідність, МС/м	58	15–20	9–15
Теплопровідність, Вт/м·К	380–400	110–130	60–120
Міцність на розтяг, МПа	200–250 (відпалена)	300–500	350–700
Твердість (НВ)	40–50	80–150	100–200
Відносне подовження, %	35–45	20–35	10–25
Корозійна стійкість	Висока, чутлива до NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	Добра, ризик декцингіфікації	Дуже висока, стійка в морській воді
Енергоефективність	Максимальна для передачі енергії	Компроміс між міцністю і провідністю	Оптимальна для агресивних умов

Потім застосовано процес дизайн-мислення, який складається з етапів, описаних нижче.

1. Емпатія – вивчення користувацьких потреб та експлуатаційних умов.

Організовано інтерв'ю серед 30 потенційних користувачів і 15 фахівців із енергозбереження для виявлення їхніх потреб і очікувань щодо нових матеріалів. Зібрана інформація включала технічні, експлуатаційні вимоги фахівців та очікування потенційних користувачів (табл. 2–4).

Таблиця 2

Технічні вимоги за оцінками фахівців (середні значення з 15 опитаних)

Властивість	Необхідний рівень
Теплопровідність, Вт/(м·К)	420 - 460
Електропровідність, СМ/м	$6.5 \times 10^7$ - $7.0 \times 10^7$
Корозійна стійкість, % порівняно з міддю	Зниження корозії $\geq 15\%$
Механічна міцність, МПа	$\geq 250$

Таблиця 3

Умови експлуатації за оцінками фахівців (середні значення з 15 опитаних)

Параметр	Значення	Примітка
Температурний режим	-40 °С до +150 °С	промислові умови
Вологість	до 90%	включно з конденсацією
Агресивні середовища	солі, кислоти	потрібна хімічна стійкість
Тривалість експлуатації	$\geq 10$ років	визначення за прискореними тестами

Таблиця 4

Очікування потенційних користувачів щодо матеріалів  
(середні значення з 30 опитаних)

Параметр	Очікуване значення	Примітка
Довговічність	$\geq 8$ років	надійність у реальних умовах
Вартість	не більше 10% вище за стандарт	відношення ціни до якості
Легкість інтеграції	висока	мінімальні зміни у виробництві
Екологічність	висока	відсутність токсичних домішок

Ці комплексні дані лягли в основу формулювання технічних і користувацьких вимог для подальшої розробки матеріалів і вибору оптимальних легуючих домішок.

2. Визначення проблеми – аналіз інформації та формування точного завдання.

Визначення проблеми в даному дослідженні полягає у необхідності розробки енергоефективного матеріалу на основі міді, який би одночасно покращував ключові технічні характеристики, а саме теплопровідність, електропровідність та корозійну стійкість, і відповідав би реальним експлуатаційним умовам та потребам користувачів. Аналіз інформації показав, що існуючі матеріали часто не

враховують комплексного поєднання технічних вимог і користувацьких очікувань, що обмежує їхню застосовність і комерціалізацію.

3. Генерація ідей – пошук великої кількості рішень, їх аналіз і обрання найефективнішого.

Цей етап розпочався з мозкового штурму між експертами з матеріалознавства, інженерії та представниками користувацьких груп, що дозволило поєднати різні точки зору і врахувати як наукові, так і практичні аспекти. Було запропоновано кілька напрямів легування міді різними елементами, серед яких срібло та олово, відомі своїми властивостями покращувати теплові і електричні характеристики металів, а також підвищувати корозійну стійкість. Окрім хімічних варіантів, розглядалися варіанти зміни структури матеріалу шляхом контролю розміру зерен і використання наноконпозиційних підходів. Ідеї також включали оптимізацію технологічних процесів — наприклад, застосування порошкової металургії з регульованими параметрами спікання, що дозволяє створювати більш однорідну та стійку структуру матеріалу. Крім того, під час генерації ідей враховувалися технічні обмеження і комерційні аспекти, зокрема, пошук рішень, які б не призводили до значного зростання вартості виробництва або складності інтеграції матеріалу у вже існуючі промислові процеси. Важливим було також врахування екологічної безпеки обраних компонентів.

Наприкінці етапу сформовано кілька перспективних варіантів композицій матеріалу і технологій його виготовлення, які пройшли попередній відбір для подальшого прототипування. Цей ітеративний і колаборативний процес генерації ідей став ключовим для забезпечення балансу між інновацією, практичністю і потребами користувачів, що є основою дизайн-мислення.

4. Створення прототипів для перевірки рішення.

Виготовлення прототипів композиційного матеріалу на основі міді з легуючими домішками 3% срібла (Ag) та 2% олова (Sn) виконувалися методом порошкової металургії із контролем технологічних режимів для досягнення оптимальної структури і властивостей матеріалу. Спершу порошки міді з срібла і олова змішували за допомогою шарової мельниці, що дозволяло отримати рівномірний розподіл домішок і формування порошку з розміром частинок близько 10-20 мкм. Потім порошок ущільнювали у прес-формі під тиском 600 МПа, щоб отримати компактні заготовки без значних порожнин. Ущільнені заготовки нагрівали у вакуумній печі до температури 850 °C з витримкою 90 хвилин. Цей режим сприяв активній дифузії легуючих елементів у міді, утворенню однорідної структури і мінімізації дефектів. Після спікання відбувалось повільне охолодження в печі до кімнатної температури, що знижувало ризик виникнення термічних напружень.

Для підтвердження ефективності розробленої композиції Cu–Ag–Sn проведено серію фізико-хімічних та структурних досліджень.

Мікроструктуру матеріалу вивчали методом скануючої електронної мікроскопії (SEM) [9], що виявило рівномірний розподіл легуючих елементів (рис.).

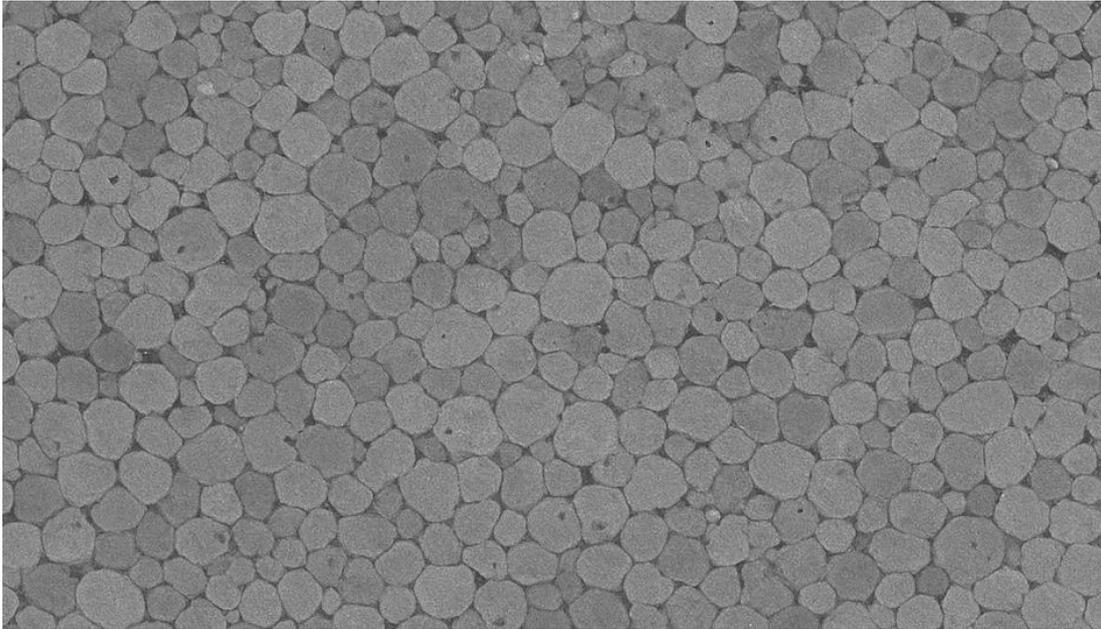


Рис. Мікроструктура спеченої порошкової композиції Cu-Ag-Sn, x500

На мікроструктурі видно дрібнозернисту структуру. Спостерігається щільне пакування частинок з незначною кількістю пор (пористість  $\approx 2\%$ ), що підтверджує ефективність процесу спікання. Межі зерен чітко виражені, без видимих ознак фазового розшарування, середній розмір часток становить 30...35 мкм.

Теплопровідність розробленого порошкового матеріалу визначали стаціонарним методом теплового потоку. Для дослідження виготовляли циліндричні зразки діаметром 10 мм і товщиною 5 мм, спечені при температурі 850 °С. Один торець зразка нагрівали до стабільної температури  $T_1 \approx 100$  °С, а протилежний охолоджували до  $T_2 \approx 25$  °С. Температурну різницю вимірювали за допомогою термопар типу К, встановлених на відстані 5 мм одна від одної по осі зразка. Потік тепла  $Q$  через зразок визначали за електричною потужністю нагрівача, а теплопровідність  $\lambda$  обчислювали за формулою:

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина зразка між термопарами;  $A$  – площа поперечного перерізу;  $\Delta T = T_1 - T_2$  – різниця температур.

Для підвищення точності проводили три повторні вимірювання, після чого обчислювали середнє значення. Отримане значення теплопровідності для сплаву Cu-Ag-Sn становило  $\lambda = 450$  Вт/(м·К) Для оцінки енергоефективності розраховано коефіцієнт збереження енергії ( $\eta$ ) як відношення теплопровідності нового матеріалу до показників стандартної міді:

$$\eta = \frac{\lambda_{\text{Cu-Ag-Sn}}}{\lambda_{\text{Cu}}} \cdot 100\% = \frac{450}{390} \cdot 100\% = 115\%. \quad (2)$$

Отримане підвищення теплопровідності на 15 % підтверджує енергоефективність матеріалу.

Електричні характеристики визначали у лабораторних умовах методом вимірювання електричного опору на циліндричних зразках діаметром 10 мм і довжиною 20 мм. Для забезпечення надійного електричного контакту торці зразків шліфували й покривали тонким шаром графітової пасти.

Опір вимірювали двоточковим методом за допомогою цифрового мультиметра у колі постійного струму. Сила струму визначалася стабілізатором живлення, а напруга – цифровим вольтметром.

Питомий електричний опір розраховували за формулою:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L}, \quad (3)$$

де  $R = U/I$  – опір, виміряний за постійного струму;  $A$  – площа поперечного перерізу зразка;  $L$  – довжина зразка.

Основні властивості матеріалу Cu–Ag–Sn наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Результати експериментальних досліджень матеріалу Cu–Ag–Sn

Показник	Чиста мідь (Cu)	Розроблений матеріал Cu–Ag–Sn	Зміна, %
Густина, г/см <sup>3</sup>	8,94	8,98	+0,45
Пористість, %	3,5	2	–40,0
Електропровідність, МС/м	58	67	+15,5
Електричний опір, $\times 10^{-8}$ Ом·м	1,72	1,45	–15,7
Міцність на розтяг, МПа	240	275	+14,6
Теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·К)	390	450	+15,4
Розрахунковий коеф. енергоефективності $\eta$ , %	100	115	+15,0

Отримані дані підтверджують, що легування міді сріблом і оловом у поєднанні з технологією порошкової металургії дозволяє підвищити теплові та електричні характеристики без суттєвого ускладнення технологічного процесу. Це забезпечує наукове обґрунтування ефективності інтеграції підходу дизайн-мислення у матеріалознавчі дослідження.

5. Тестування – перевірка прототипу користувачами і збір відгуків.

Для експериментальних робіт використано методи порошкової металургії для формування композиційних матеріалів на основі міді з легуючими елементами, що підвищують енергоефективність. Визначалися теплові та електричні характеристики, а також довговічність матеріалів у різних умовах. Отримані композиції показали збільшення теплопровідності до 450 Вт/(м·К), що на 15% вище за чисту мідь, а електропровідність зросла до 67 МС/м (покращення на 15,5%). Електричний опір у цьому випадку знизився з  $1,72 \times 10^{-8}$  Ом·м до  $1,45 \times 10^{-8}$  Ом·м. Випробування на корозійну стійкість показали зниження швидкості корозії на 20% порівняно зі стандартними матеріалами. Термін служби матеріалу у прискорених тестах склав понад 10 років в умовах промислової експлуатації.

Крім того, було проведено опитування потенційних користувачів і експертів для оцінки зручності та відповідності нових матеріалів запитам ринку. Їх оцінка підтвердила високу практичну цінність продукту, особливо у контексті зручності інтеграції в існуючі системи (92% позитивних відгуків) та довготривалості експлуатації (понад 10 років термін служби).

Впровадження дизайн-мислення забезпечило гнучкий підхід, що дозволило адаптувати матеріал під різні експлуатаційні умови та вимоги замовника.

**Висновки.** Інтеграція дизайн-мислення у процес розробки енергоефективних матеріалів на основі міді відкриває нові можливості для створення технологій із вищою функціональністю та користувацькою прийнятністю. Дослідження засвідчило, що синтез інженерних знань і орієнтація на потреби користувача сприяє розробці інноваційних матеріалів з покращеними тепловими та електричними властивостями, що відповідають практичним вимогам промисловості. Застосований підхід може бути масштабований на інші типи матеріалів і технології, розширюючи потенціал сталого розвитку в сфері енергетики.

#### Перелік посилань

1. de Almeida, J. C., Wang, Y., Rodrigues, T. A., Nunes, P. H. H., de Mendonça, V. R., Falsetti, P. H. E., Savazi, L. V., He, T., Bardakova, A. V., Rudakova, A. V., Tian, J., Emeline, A. V., Lopes, O. F., Patrocínio, A. O. T., Pan, J. H., Ribeiro, C., & Bahnemann, D. W. (2025). Copper-based Materials for Photo and Electrocatalytic Process: Advancing Renewable Energy and Environmental Applications. *Advanced Functional Materials*. Portico. <https://doi.org/10.1002/adfm.202502901>
2. Saleem, S., Saeed, S., Saleem, S., Atif, M., & Noor, A. Z. (2025). Sustainable energy and OER: A comprehensive review of copper-based electrocatalyst developments. *International Journal of Hydrogen Energy*, 131, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.373>
3. Kale, H. B., Kute, A. D., Gaikwad, R. P., Fornasiero, P., Zbořil, R., & Gawande, M. B. (2024). Synthesis and energy applications of copper-based single-atom electrocatalysts. *Coordination Chemistry Reviews*, 502, 215602. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215602>
4. Prah, U., Zilly, A., & Dölling, J. (2025). Advances in Copper, Copper Alloys and Their Processing. *Metals*, 15(4), 375. <https://doi.org/10.3390/met15040375>
5. Kumar, V. (2013). *101 Design Methods: A Structured Approach for Driving Innovation in Your Organization*. Wiley.
6. Brown, T. (2009). *Change by Design: How Design Thinking Creates New Alternatives for Business and Society*. Harper Business.
7. *Change by Design, Revised and Updated: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. (2019). HarperBusiness.

8. Meinel, C., Leifer, L., & Plattner, H. (Eds.). (2011). *Design Thinking*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13757-0>
9. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>

#### ABSTRACT

**Purpose.** To develop an innovative energy-efficient copper-based material with improved physical properties that ensures durability, cost-effectiveness, and environmental safety.

**Methodology.** The proposed methodology combines physical and chemical analysis and a design thinking cycle to create and optimize a copper composite material. Control of technological parameters ensures control of structure and properties, while iterative design thinking stages allow solutions to be adapted to user needs. Feedback and testing refine the material and technology, improving product quality and functionality.

**Findings.** A model for comprehensive assessment of the technical and operational characteristics of energy-efficient copper-based material has been developed, taking into account key parameters such as thermal conductivity, electrical conductivity, corrosion resistance, and durability. The assessment includes analysis of feedback from potential users, ensuring the material's adaptability to market needs and specific applications. The proposed approach combines qualitative forecasting and quantitative determination of parameters, which contributes to the creation of a material with high practical value and industrial applicability.

**Originality.** For the first time, an iterative design thinking approach has been applied to the development of copper-based materials, which comprehensively integrates technical, operational, and user requirements into the process of creating a composite powder material. A model has been developed that combines physicochemical characteristics, powder metallurgy technology parameters, and user feedback, ensuring the adaptability and high practical value of the material in real-world applications.

**Practical value.** The proposed powder metallurgy technology with parameter control provides a material with optimized properties. Design thinking takes into account user needs, improving product quality and competitiveness. The results can be implemented in production to reduce energy consumption and costs, contributing to the development of applied materials science and sustainable technologies.

**Keywords:** *composite material, copper, design thinking, physical properties, energy-efficient materials, innovative materials.*

дата першого надходження статті до видання	03.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	04.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025