

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І.М.ФРАНЦЕВИЧА

ДЕРЕВ'ЯНКО Олександр Васильович



УДК 621.762.5:621.762.660.2:669:532.6:541

**ОСОБЛИВОСТІ СПЛАВОУТВОРЕННЯ ПРИ КОНСОЛІДАЦІЇ  
ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АБРАЗИВ-МЕТАЛЕВИХ  
СИСТЕМ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ**

Спеціальність: 05.16.06- "Порошкова металургія та композиційні матеріали"

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ-2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті проблем матеріалознавства  
ім. І. М. Францевича  
Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, **Райченко Олександр Іванович** Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, м. Київ.  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник, **Згалат-Лозинський Остап Броніславович**, зав. відділу термомеханічної обробки тугоплавких матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент, **Богомол Юрій Іванович**, в.о. зав. кафедри "Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії" Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, м. Київ

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, **Присташ Микола Сергійович**, відділ імпульсної обробки дисперсних систем  
Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв

Захист відбудеться "27 вересня" 2021 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.207.03 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України: 03680, м. Київ-142, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розісланий "12 серпня" 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д. 26.207.03  
кандидат технічних наук



Хоменко О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Виробництво композиційних матеріалів на основі абразив-металевих систем методами електроспінання є одним із сучасних підходів, що інтенсивно розвивається. Одним із різновидів цих методів є технологія електро-розрядного спікання (ЕРС), яка базується на застосуванні безпосереднього проходження електричного струму крізь пресовку. В літературі також можна знайти різні варіанти цього методу, такі як іскро-плазмове спікання (Spark Plasma Sintering), плазмо-активоване спікання (Plasma Activated Sintering) або технологія спікання під дією зовнішнього поля (Field Assisted Sintering Technology). В нашому випадку технологія спікання електричним струмом передбачає використання спрямованого постійного струму, що також можна назвати технологією електрокондуктивного спікання.

Більшість досліджень по консолідації порошкових систем методами електроспінання проводять для композиційних матеріалів, де необхідно досягати достатньо високих температур та застосовувати захисне середовище. А наявність в тілі металевої матриці, що плавиться, твердих включень різної геометрії та природи може суттєво впливати на механізм проходження процесів сплавоутворення та ущільнення під час електрообробки порошкового матеріалу. В той час процес консолідації може проходити із утворенням рідкої фази під дією електричного струму, наприклад таке можливе для абразив-металевих композицій, де абразивом може слугувати алмаз чи оксид алюмінію, при температурах 500-1200 °С та тривалості процесу в декілька хвилин. З метою зменшення температури початку процесу консолідації в склад абразиввміщуючих матеріалів на основі алмазів чи корунду традиційно вводять різної природи активуючі добавки (зв'язки на основі Cu-Sn, Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Sn-Co-Cr та інше). Це дозволяє проводити процес консолідації при вісно низьких температурах із утворенням рідкої фази при малій тривалості самого процесу (всього до декількох хвилин). В той же час, процеси, що відбуваються в матеріалі при його консолідації під дією електричного струму з утворенням рідкої фази майже не досліджуються.

Виходячи з цього можна сформулювати питання щодо потреби вивчення та застосування механізмів, що можуть інтенсифікувати процеси масообміну під дією електричного струму між порошковими частинками, що контактують між собою.

На даний момент вивчення процесів масообміну між поверхнею твердої частинки та прошарком, що утворює рідка фаза (розплав), що її оточує, визначення механізмів розчинення та взаємодії за умови безпосереднього проходження крізь пресовку електричного струму при отриманні композиційних матеріалів з металевою компонентою є *актуальним питанням*, вирішення якого дозволить суттєво покращити якість абразив-металевих виробів та технологію їх виготовлення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота відповідає основним науковим напрямкам робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича та виконана відповідно до відомчих та пошукових тем:

- Тема 1.6.2.5–97 (1997–2000 рр., № держреєстрації 0193U017361): Термодинаміка, кінетика та гідродинаміка процесів високотемпературного змочування, капілярного транспорту, контактної взаємодії та адгезії в технології одержання та нероз'ємного з'єднання нових матеріалів. Розділ: Електродинамічні течії в рідких металах і розплавах, що вміщують сторонні включення (Книга 2).
- Тема 1.6.2.13–01 (2001–2003 рр., № держреєстрації 01010001651): Дослідження процесів масоперенесення та структуроутворення при обробці дисперсних сумішей електричним струмом з метою одержання композиційних матеріалів з металічною матрицею та наповнювачами.
- Тема Ц/7-02 (2002–2006 рр., № держреєстрації 0102U001247): Вивчення закономірностей формування границь зерен та міжфазних границь матеріалів в процесах керованого спікання під дією тиску і зовнішніх полів та оптимізація технології створення наноструктурної тугоплавкої кераміки.
- Тема III-11-09 (2009–2011 рр., № держреєстрації 0109U000701): "Розробка науково-технологічних основ синтезу дисперсних та ущільнених композитів, що містять вуглець та метали, електроплазмовою обробкою та електророзрядним спіканням".
- Тема II-2-11 (2011 р., Договір від 2011.02.07 № 285, № держреєстрації 0111U002897): "Створення обладнання для одержання металевих та керамічних композитів іскро-плазмовим спіканням порошків", Етап 1 "Розробка експериментального зразка обладнання для іскро-плазмового спікання порошків".
- Тема 3-9-18 (2018–2020) "Створення твердосплавних порошкових плакованих матеріалів та градієнтних електроіскрових покриттів з них".
- Тема II-7-20 (2020–2021 рр.) "Науково-технологічні принципи термічного синтезу і консолідації порошків на основі залізвуглецевих та нікелевих сплавів, армованих високомодульними сполуками з карбідів (карборидів) титану та вольфраму для отримання високозносоустійких композиційних матеріалів та покриттів".

Також у дисертації відображені роботи, що здійснювалися у рамках міжнародних проектів: Фонду цивільних досліджень і розвитку США (CRDF), UE2-2434-KV-02 "Ключові процеси консолідації для отримання щільної нанозеренної кераміки та інженерії поверхні розділу"; проект НТЦУ 3498 "Розробка технології електророзрядного спікання алмазно-металевих гранул з метою одержання більш ефективного алмазного інструменту" ("The elaboration of the electrodischarge sintering technology of diamond-metallic granules for obtaining high effective diamond tools") 2006–2009 р.р.

Виконувався спільно із Інститутом Металургії і Матеріалознавства (ІММ) ім. Ф.Н. Тавадзе АН Грузії та Грузинським Технічним Університетом (ГТУ) Мін. освіти Грузії.

**Мета роботи:** дослідження закономірностей взаємодії між компонентами металевої зв'язки (Cu-Sn, Ni-Al) в композитах на основі алмазів та оксиду алюмінію під дією електричного струму на границі переходу поверхня твердої частинки – прошарок рідкої фази (розплав) під час отримання високотносостійких матеріалів, вивчення їх функціональних характеристик при обробці граніту та мармуру.

**Для досягнення мети в роботі необхідно було вирішити наступні задачі:**

1. Розробка фізичних і математичних моделей, які враховують дії електричних і температурних факторів на процеси переміщення речовини на межі тверда поверхня – оточення (рідка фаза) в під дією постійного електричного струму порошкових високотносостійких матеріалів на основі металевої зв'язки, де компонентами є Cu-Sn, Ni-Al, які передбачають:
  - аналіз існуючих теоретичних підходів по вивченню питання щодо процесів переміщення речовини під дією постійного електричного струму на переході поверхня твердого тіла – оточення (рідка фаза).
  - проведення розрахунків на основі елементарної моделі комірочки, яка включає частинку порошку в оточенні рідкої фази, що враховують експериментальні результати та спрямовані на визначення впливу розмірно-геометричного фактору і зміни електричних властивостей складників металевої зв'язки від температури.
2. Формулювання новітніх підходів до процесу консолідації абразиввміщуючих порошкових матеріалів із металевою зв'язкою під дією постійного електричного струму. Аналіз процесів масообміну між компонентами порошкової суміші та масопереміщення речовини по об'єму елементарної одиничної комірочки при спіканні із утворенням рідкої фази під дією постійного електричного струму, які передбачають:
  - визначення режимів мінімальної тривалості процесу при отриманні композиційного матеріалу під дією електричного струму на основі запропонованих математичних підходів.
  - проведення дослідження характеристик абразиввміщуючих матеріалів із металевою зв'язкою, що отримані під дією постійного електричного струму та визначення оптимальних режимів консолідації для досягнення високих механічних, триботехнічних та функціональних властивостей виробів з алмаз-металевих композитів.

**Об'єкт дослідження:** процеси переміщення речовини під дією електричного струму на межі переходу поверхня твердого тіла (порошкова частинка) – рідка фаза (розплав).

**Предмет дослідження:** закономірності структуроутворення в композиційних матеріалах на основі алмазів чи оксиду алюмінію та металевих зв'язок (Cu-Sn, Ni-Al) під час їх консолідації.

**Методи дослідження.** В роботі використані такі методи досліджень, як: математичний аналіз, оптична мікроскопія, рентгенофазовий аналіз, хімічний аналіз, механічні випробування на абразивну здатність, що використовують методику зішліфовування на основі ГОСТ 25594-83.

### **Наукова новизна**

1. Вперше запропоновано модель елементарної комірки, яка описує закономірності взаємодії між компонентами металевої зв'язки (Cu-Sn, Ni-Al) в порошкових матеріалах на основі абразив-металевих систем на границі переходу поверхня твердої частинки – прошарок рідкої фази (розплав) в процесах спікання під дією постійного електричного струму.
2. Вперше для визначення ступеня проходження процесів масоперенесення речовини із поверхні твердого тіла у прошарок рідкої фази та подальшої оптимізації режимів отримання композиційних алмазвміщуючих матеріалів з металевою зв'язкою, що проходять з утворенням рідкої фази під дією електричного струму застосовано критерій Шервуда.
3. Вперше виявлено ефект переміщення твердих компонентів металевої зв'язки під дією електричного струму, що починає проходити вже при величині критерія Релея 62,2-78,7 на відміну від його величини у 1707 при застосуванні традиційних методів консолідації порошкових матеріалів.

### **Практична цінність**

1. Розроблені автором алгоритми розрахунку швидкості переміщення та напрямків розповсюдження розплавленої речовини навколо порошкової частинки, а також визначення ступеня проходження процесів сплавоутворення між компонентами під дією електричного струму дозволяють знизити час та температуру процесу консолідації абразив-металевих матеріалів інструментального призначення, що забезпечує економію енергетичних ресурсів до 20%.
2. На основі проведених автором теоретичних і експериментальних досліджень було розроблено режими отримання алмазвміщуючих композитів на основі мідь-олово-кобальт при пропусканні спрямленого постійного електричного струму. Отримані матеріали були випробувані на ТОВ "НПК "АГРОППРОМДЕТАЛЬ" (акт від 22 грудня 2020 року) та рекомендовані для виготовлення сегментів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, викладені в роботі, отримані особисто автором або за його безпосередньої участі в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. Постановка

задачі, планування експериментів, вибір об'єктів досліджень, обговорення результатів та підготовка публікацій до друку проводилась спільно з науковим керівником д.т.н., професором Райченко О.І. та д.т.н. Згалат-Лозинським О.Б. Здобувачем було сформульовано основні висновки щодо роботи. Підготовка та модернізація установки ЕРАН 2/1 з метою покращення роботи системи управління електричними параметрами по зворотному зв'язку в режимі спікання порошкових матеріалів проведена завдяки м.н.с. Колесніченко В.Г. Зразки були виготовлені на установці ЕРАН 2/1 разом з н.с. Істоміною Т.І. Дослідження на абразивну здатність були виконані спільно із н.с. Істоміною Т.І. та інж. Гавриш І.Д., рентгеноструктурні дослідження проведено спільно з к.т.н. Ершовою О.Г (відд. 58).

**Апробація роботи.** Основні результати роботи були представлені та обговорені на 10 семінарах Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України і фахових конференціях: Третя міжнародна науково-технічна конференція "Нетрадиційні електромеханічні і електричні системи". Алушта, Крим, Україна, 19–21 вересня 1997; Міжнародна конференція "Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии" (PM-97). Київ, листопад 1997; Міжнародна конференція "Fluid Flow Phenomena in Metals Processing" (TMS-99), TMS (Minerals•Metals•Materials). Сан-Дієго, США, 28 лютого – 4 березня, 1999; Міжнародна конференція "Second International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Minerals & Process Industries", CSIRO, (CFD-99), Мельбурн, Австралія, 6–8 грудня, 1999; Міжнародний XXXVII семінар "Актуальні проблеми міцності", 3–5 липня, Київ, 2001; Міжнародна конференція "Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике". – Київ, Україна. 8-12 вересня. 2003; Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы". Киев, Украина. 26-30 сентября 2005; International conference "Clusters and Nanostructured Materials". Abstracts. Uzhgorod, Ukraine. 2006; 6th International conference "HighMathTech 2019". October 28-30, Kyiv, Ukraine, 2019; 7th International Samsonov Conference "Materials Science of High Melting Compounds" (MSHMC). – May 25-28, Kyiv, Ukraine, 2021.

**Публікації.** повною мірою викладено в **24** наукових працях, із них **10** статей у провідних наукових фахових виданнях, що входять до наукометричних баз даних SCOPUS, Web of Science of Thomson Reuters та ін. та у відчизняних виданнях, що входять до переліку фахових видань МОН України, **1** патент на винахід, **10** публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних конференціях. Всі надруковані праці за темою дисертації виконані автором у співавторстві.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків та переліку використаних джерел і 2 додатків. Обсяг роботи становить 8,0 авторських аркуші, які включають 60 рисунків, 28 таблиць та 2 додатки, список використаних джерел із 161 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито суть і стан наукової задачі, обґрунтовано її актуальність щодо розвитку, сформульовано мету, основні завдання та методи досліджень, визначено новизну отриманих результатів та обґрунтовано їх практичну цінність, наведено відомості про апробацію та відповідні публікації по матеріалах дослідження.

**У першому розділі** проведено огляд науково-технічної літератури, щодо методів консолідації із використанням дії електричного струму. Описано фізичні явища, які продукуються дією електричного струму. Показано, що наукові дослідження сьогодення спрямовані на розробку технологічних прийомів по отриманню композиційних матеріалів при застосуванні технології електроспінання.

Проаналізовано сучасні теоретичні дослідження про поведінку порошкової засипки під дією електричного струму на макро- і мікрорівнях. Проведено аналіз літературних джерел, які описують моделі елементарної комірки, що необмежена у просторі, розглянуто рух розплавленої компоненти, виникнення поля концентрацій та переміщення речовини при утворенні рідкої фази під дією електричного струму.

На прикладі теоретичних і експериментальних даних показано, що разом із температурою, при консолідації порошкових матеріалів під дією електричного струму при утворенні рідкої фази під час спікання, на формування структури матеріалу також впливають і сили електромагнітного походження, які виникають під час проходження електричного струму крізь прес-інструмент.

**У другому розділі** описано порошкові матеріали, прес-інструмент та устаткування і методики дослідження (рисунок 1). Для отримання алмазвміщуючих композитів на мідно-кобальтовій зв'язці використовували суміш порошків міді, олова, кобальту, хрому і алмазів (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм).





Рисунок. 1 – Приклад прес-інструменту та типи виробів абразиввміщуючих виробів

Технологічну схему виготовлення абразив-металевих матеріалів наведено на рисунку 2.



Рисунок. 2 – Схема виготовлення зразків

Розробка оптимальних технологічних режимів отримання якісних виробів, що містять абразив, проводили із врахуванням рівня електричного навантаження, потрібного для отримання абразиввміщуючих композитів інструментального призначення.

Випробовування алмазвміщуючих композиційних матеріалів на працездатність по граніту та мармуру була проведена за методом зішліфовування відповідно до оригінальної методики на основі ГОСТ 25594-83.

У третьому розділі проведений теоретичний аналіз, який показує, що у разі відмінності електропровідності поверхні твердої частинки, як компоненти дисперсного тіла, від електропровідності рідкого оточення (а це має місце практично завжди), по об'єму прошарку ініціюється направлене переміщення речовини за рахунок дії на частинку електромагнітної виштовхувальної сили, яку іноді називають квазіархімедовою силою електромагнітного походження (1):

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{F}_{em} = \frac{\mu_0 I^2 r_i^3}{\pi r_0^4} \left[ \frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i} \right] r \mathbf{i}_r \quad (1)$$

де  $\mathbf{F}_{em}$  сила електромагнітного виштовхування, Н,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м,  $I$  - величина електричного струму, А,  $r_i$  - радіус частинки м,  $r_0$  - радіус пресовки, м,  $r$  - радіальна координата розташування частинки, м,  $\lambda_n$  - електропровідність  $n$ -го компонента,  $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ,  $\mathbf{i}_r$  - орта.

Показано, що за такої динаміки перенесення речовини з поверхні твердих частинок в рідку фазу визначається вже не тільки звичайною атомною (концентраційною) дифузією, а також, і дифузією електроконвективного походження. Виявлено, що виникнення переміщень під дією спрямленого постійного електричного струму відбувається вже при дуже малих значеннях числа Релея на відміну від звичайних умов, коли число Релея дорівнює 1707 (2) (таблиця 1).

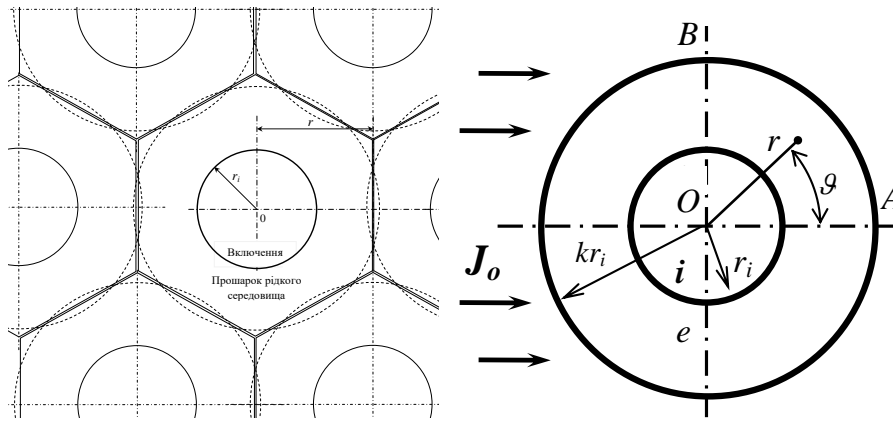
$$Ra = \frac{\beta_s \Delta T g h^3}{a_s \nu} \geq Ra_c \cong 1707 \quad (2)$$

де  $\beta_s$  - коефіцієнт температурного розширення,  $\Delta T$  - різниця температур між низом і верхом,  $h$  - висота,  $a_s$  - температуропровідність,  $\nu$  - кінематична в'язкість.

Таблиця 1. Величини чисел Релея

Тип системи	Число Релея, Ra
олово — частинки сплаву нікелю	62,2
олово — частинки корунду	78,7

Для проведення моделювання визначено елементарну комірку порошкового тіла, крізь яку проходить постійний електричний струм (рисунок 3).



$r$  – радіальна координата,  $\vartheta$  – величина кута,  $i$  – тверда частинка,  $e$  – струмопровідний прощарок,  $J_0$  – величина густини електричного струму на деякому віддаленні.

Рисунок 3 – Загальне просторове накреслення елементарної комірки двокомпонентної системи типу тверда частинка - розплав

З метою спрощення процесу моделювання щодо проходження процесів тепло- і масопереносу введено коефіцієнт комірки, що є відносною товщиною прощарку рідкої фази між частинками і може становити на практиці не менше як 1 (3):

$$k = \frac{r_e}{r_i} \geq 1 \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт елементарної комірки, що є добуток величини радіуса зовнішньої умовної межі комірки до величини радіуса твердої частинки,  $r_i$  – радіус частинки,  $r_e$  – зовнішня межа умовної елементарної комірки, що є половина найменшої відстані між центрами сусідніх твердих частинок (рисунок 4)

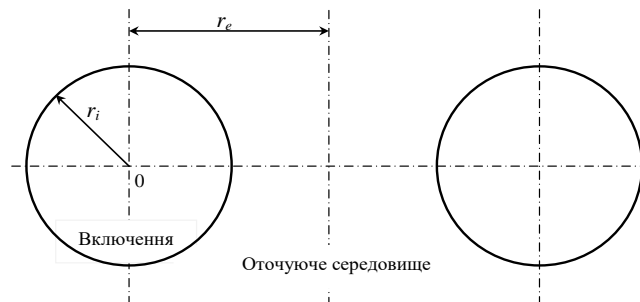


Рисунок 4 – Схематичне зображення прощарку між частинками

Проведено теоретичні розрахунки поля швидкості та концентрацій по розплавленому прощарку з урахуванням прийнятих граничних умов вирішення задачі для порошкових тіл, що можуть вміщувати Cu-Sn, Cu-Al з різними коефіцієнтами комірки  $k=2$  і  $4$ . Результат порівняння показав принципову тотожність картин прорахованого накреслення переміщення

речовини по прошарку із коефіцієнтами комірки при  $k=2$  і  $4$ . Переміщення речовини у прошарку під дією постійного електричного струму для четвертого квадранта комірки показано на рисунку 5. Швидкість переміщення речовини по прошарку розплавленого олова складає  $3-3,5 \times 10^{-6}$  м/с (3-3,5 мкм/с). При такій величині швидкості речовина більш тугоплавкої компоненти (наприклад, мідь) повинна розчинятися в рідкій фазі достатньо швидко, що і підтверджується практичними дослідженнями.

Використовуючи формулу визначення критерія Шервуда (3), що являє собою добуток інтегральної величини всіх дифузійних процесів (в тому числі електроконвективної дифузії) до атомної, визначено залежність критерія Шервуда від густини електричного струму по комірці (рисунок 6, 7). Різниця із отриманим попередньо визначенням критерія Шервуда полягає із урахуванням граничних умов щодо вирішення поставленої задачі для елементарної комірки, які враховують вже не тільки обмежаність комірки у просторі, а й взаємне переміщення рідкої фази між комірками.

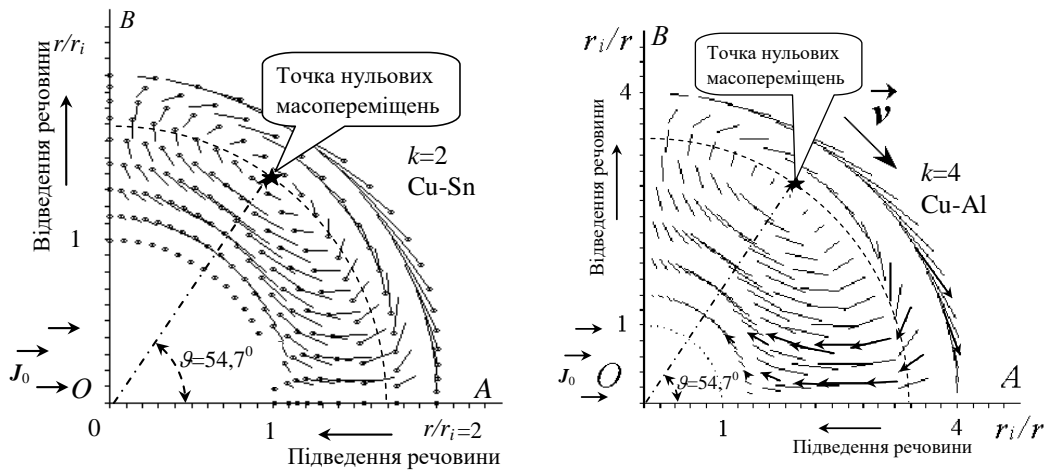


Рисунок 5 – Векторне поле напрямку переміщень для різних  $k$

$$Sh = 0,677 \cdot \left( \frac{r_i^4 J_0^2 \mu_0 \mu_e}{\eta D} \cdot |A^3 f(A, k)| \right)^{1/3} \quad (3)$$

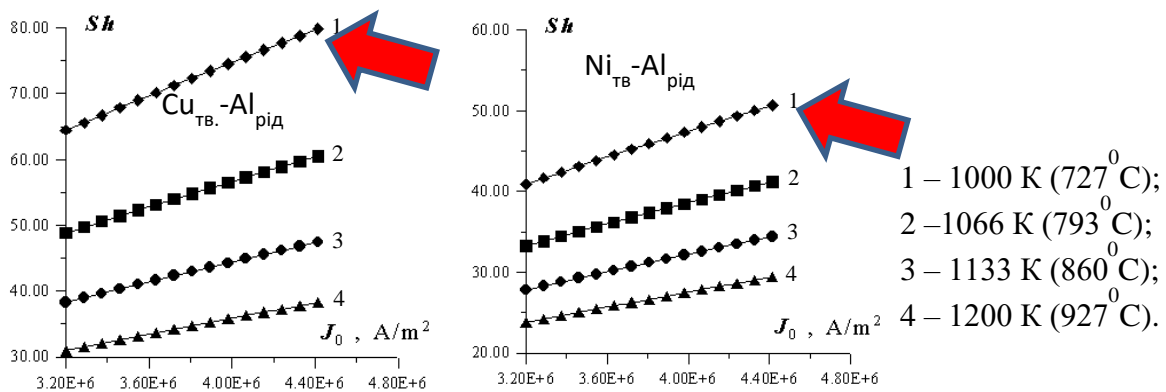


Рисунок 6 – Число Шервуда, як функція від густини струму  $J_0$

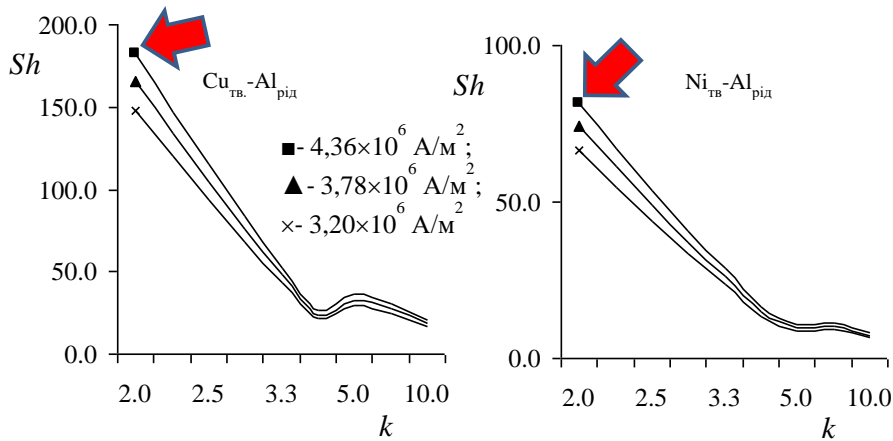


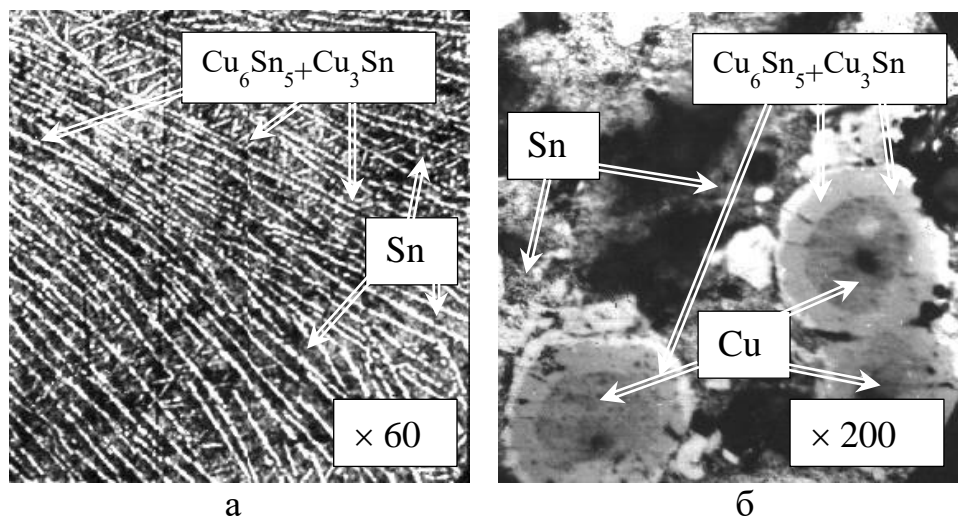
Рис. 7 – Число Шервуда, як функція від коефіцієнта комірки  $k$

Аналіз отриманих результатів показав, що під дією спрямленого постійного електричного струму температура процесу консолідації дисперсного тіла не повинна сильно перевищувати температуру плавлення металевої матриці чи наповнювача. При таких температурних умовах процеси сплавоутворення в порошковому тілі будуть проходити переважно за рахунок сил електричної природи.

**У четвертому розділі**, використовуючи моделі поведінки порошкового тіла та елементарної комірки під дією постійного електричного струму проведено визначення особливостей формування структури матеріалів на основі композицій типу метал-метал, що входять до складу металевої зв'язки на основі міді, олова, кобальту, хрому та алмазів (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм). В якості твердої сферичної компоненти було взято порошок міді, а в якості матриці, що плавиться і утворює прошарок між твердими компонентами – олово. Тобто за основу була обрана порошкова суміш складників Cu-Sn.

З метою обґрунтування ефекту від проходження електричного струму крізь порошкову пресовку проводилося два різновиди обробки (рисунок 6):  
 – з проходженням електричного струму (ЕРАН2/1);  
 – без проходження (муфельна піч).

У випадку пропускання електричного струму тривалістю 2 хв. в отриманих зразках були виявлені інтерметаліди  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  і  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Мідь (Cu) в чистому вигляді вже не виявляється. Утворюється змішаний фазовий склад: олово (Sn) + інтерметалід складу  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  і  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  довжиною до 20 мкм та шириною 0,5-1,0 мкм (рисунок 8а) із залишковою пористістю зразків 1-1,5%. Розрахована величина критерія Шервуда для порошкової суміші Cu-Sn склала 1,6-1,8.



а – отриманих під дією електричного струму,  
 б – отриманих традиційним спікання без тиску в муфельній печі.  
 Рисунок 8 – Мікроструктура зразків на основі мідь-олово

Термообробка у муфельній печі показала більш широкий фазовий склад зразків (рисунок 8б). Внутрішня структура зразків складалася із залишків міді (Cu), олова (Sn) і інтерметалідів складу  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  і  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (таблиця 2) із залишковою пористістю зразків до 10-15%.

Згідно проведених розрахунків, під дією електричного струму, разом із ефектами взаємодії компонентів виникає, явище переміщення твердих частинок по об'ємові зразка.

Було вивчено особливості формування структури металевих систем при переміщенні твердих частинок, які є складовими в матеріалах інструментального призначення при отриманні їх під дією спрямованого постійного струму (таблиця 3).

Таблиця 2. Характеристики матеріалу на основі Cu-Sn, консолідованого різними методами

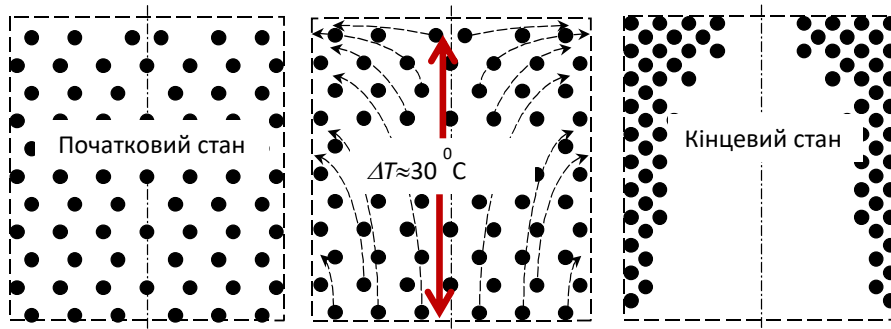
Режим обробки:	Діаметр частинок Cu, мкм	Густина струму, $\text{A}/\text{m}^2$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Тривалість спікання, с	Залишкова пористість, %
На установці ЕРАН 2/1	50-55 (масова доля Cu 20 %)	1.0- $1.5 \times 10^6$	330-400	~120	1-1,5
Традиційне спікання		---	~350	~1200 (20 хв)	10-15

Таблиця 3. Технологічні параметри електрообробки композитів

Склад засипки	Матриця, що плавиться	Розмір частинок, мкм	Розмір зразка, мм		Величина струму, А	Тривалість обробки, с (розрахована величина)
			Діаметр	Висота		
Sn + 15 мас % жароміцний сплав (4.1%Mo, 5.3%W, 10.9%Cr, 79.7%Ni)	Sn	63-100	11,5-15	4,5-5	600-650	180-240 (300)
Sn + 15 мас.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sn	63-500	13-15	6-7	600-650	180-240 (60)

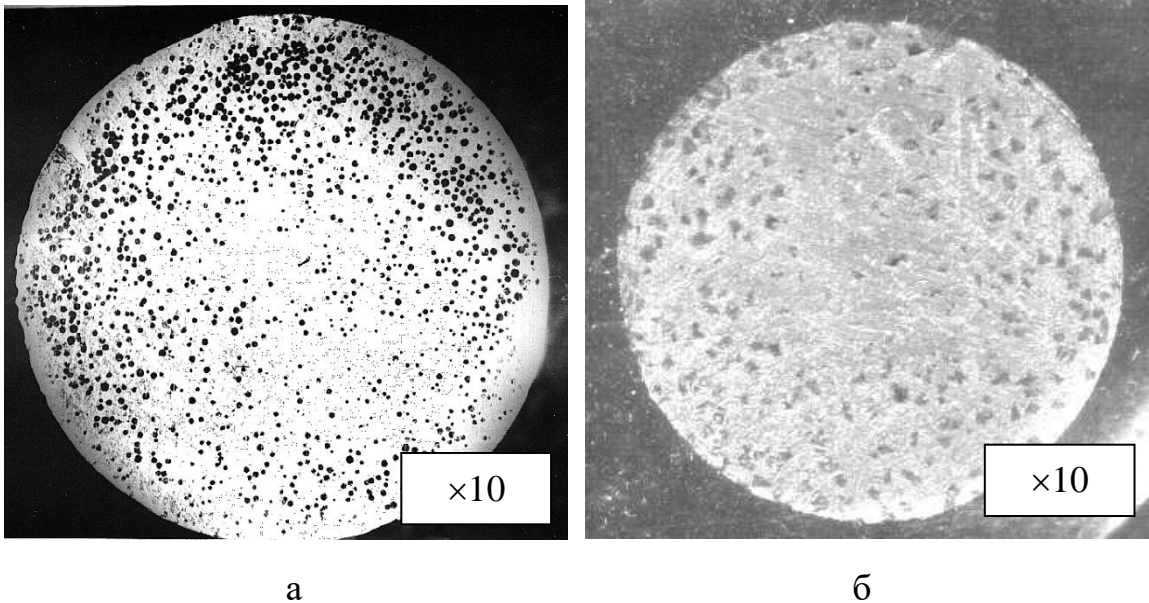
Аналіз динаміки проходження процесу консолідації в системі Ni сплав –Sn показав, що частинки нікелевого сплаву пересувалися вгору (за наявності різниці температури між основою і верхом зразка  $\Delta T \approx 30$  °С.) і одночасно до зовнішньої бічної поверхні зразка, але не з таким ефектом сепарації, як переміщувалися частинки корунду (рисунок 9, 10).

Визначено, що завдяки більшій різниці в електропровідностях між корундом і оловом, на відміну від нікелевого сплаву, сила виштовхування до бічної поверхні корундових частинок буде більшою. Формування структури композитів з ефектом переміщення твердих частинок під електро-термічним навантаженням з утворенням рідкої фази показано на рисунку 10.



- а – початковий стан;
- б – квазісуспензія;
- с – кінцевий розподіл частинок.

Рисунок 9 – Схематичне зображення перерозподілу твердих частинок.



а – Sn + тверді частинки ЖС на основі Ni;

б – Sn + частинки електрокорунду.

Рисунок 10 – Кінцевий розподіл твердих частинок в зразках.

Проведені розрахунки добре узгоджуються із результатами експериментів і дозволяють їх використовувати для попередніх оцінок перерозподілу твердих частинок різної природи в рідких електропровідних середовищах під дією електричного струму (таблиця 4).

Результат переміщень в радіальному напрямку твердих частинок у рідкому оточенні дисперсного тіла, яке може складатися із розплавленого олова і твердих частинок із жаростійкого сплаву на основі нікелю (Ni–Cr–Mo–W) чи корунду, показує різницю в динаміці твердих частинок під дією сил електричного походження. Це, у свою чергу, обов'язково позначається на часі переміщення твердих частинок під дією електричного струму, що було розраховано і представлено в таблиці 3.

Таблиця 4 – Швидкість переміщення твердих частинок у розплаві в радіальному напрямку при діаметрі зразка 20 мм

Засипка	Радіальна швидкість, м/с	
	Розрахунок	Практично отримане значення
Олово – частинки із нікелевого сплаву	$1,2-40 \times 10^{-5}$	$\sim 1,6 \times 10^{-5}$
Олово – частинки корунду	$20-580 \times 10^{-5}$	$\sim 8,3 \times 10^{-5}$

З метою оцінки теоретичних результатів були проведені експерименти по вивченню процесів взаємодії в дисперсному тілі між компонентами композиції Cu–Al та Ni–Al під дією електричного струму. Ці металеві системи є перспективними компонентами абразиввміщуючого матеріалу, як складові металевої зв'язки, інструментального призначення. Розрахунки



визначають величину  $Sh$ , як у широкому інтервалі, так і для вузького діапазону параметрів електричного струму  $i$ , відповідно, досягнутої при заданих параметрах температури. Розрахунки величини критерія Шервуда, що визначалася по режимах отримання композиційних матеріалів під дією спрямленого постійного електричного струму наведено у таблиці 5.

Таблиця 5. Критерій Шервуда для отриманих матеріалів

Параметри		Порошкова заправка	
		Cu <sub>ТВ</sub> -Al <sub>рід</sub>	Ni <sub>ТВ</sub> -Al <sub>рід</sub>
Середня розрахована масова концентрація речовини, що розчинилася в оточуючому середовищі, %	Розрахунок	12	24
	Експеримент	37	54
Величина $Sh$	Розрахунок	Мінімальне значення	148
		Максимальне значення	183
	Експеримент. значення	462,85	31,5-66,67
			39,0-82,22
			69,61-210,82

Виявлено, що для Cu-Al різниця електропровідностей складників по модулю майже вдвічі більша ніж для Ni-Al. Дану особливість також спостерігаємо при розрахунку величини критерію Шервуда. Це говорить про те, що більших взаємодій у порошковому тілі під дією електричного струму будуть зазнавати складники, які у своєму контакті між собою матимуть найбільшу різницю електропровідності.

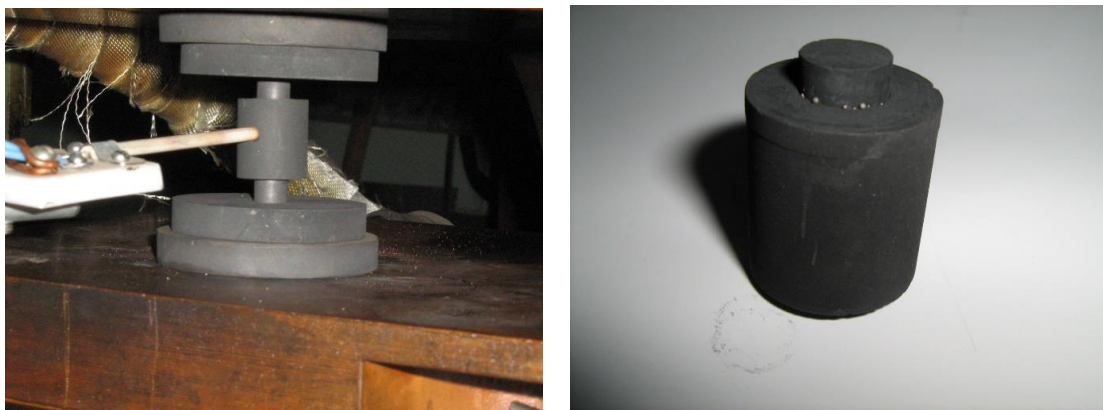
Розбіжність між експериментальним значенням критерія Шервуда ( $Sh=463$ ) і теоретичним ( $Sh=148-183$ ) насамперед пов'язана із деякими відмінностями між запропонованою в роботі моделлю елементарної комірки і реальними умовами проведення електроспикання та з інтенсифікацією процесу реакційної дифузії впродовж консолідації порошкових композицій під дією електричного струму. Подальший розвиток теорії з урахуванням більшої кількості факторів, що впливають на порошкове тіло допоможе збільшити ступінь відповідності критерія Шервуда практичним результатам.

**П'ятий розділ** присвячений отриманню алмазвміщуючого матеріалу на основі міді, олова, кобальту, хрому і алмазів (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) інструментального призначення при використанні спрямленого постійного струму та дослідженню ступеня працездатності по обробці граніту та мармуру і порівнянні із зразками промислового отримання.

Були визначені технологічні режими отримання, такі як тривалість електро-механічної дії на пресовку (величина густини електричного струму

крізь графітову матрицю є основним чинником під час електроспикання) та час технологічного циклу отримання зразків (визначився виходячи з умови, коли усадження порошкової композиції практично закінчується).

Дослідна партія зразків була виготовлена на установці ЕРАН 2/1 під дією спрямленого постійного електричного струму в графітовій прес-формі (рисунок 11) при технологічних параметрах, що наведені в таблиці 6.



а

б

а – перед електрообробкою, б – перед випресовуванням зразка  
Рисунок 11 - Зовнішній вигляд прес-форми

Проходження процесу консолідації показало, що ущільнення порошкового тіла починається при температурі на поверхні прес-інструмента  $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  і закінчується через 1,5-2 хв після початку. Отримано дослідні зразки діаметром 10 мм і висотою 4,8-5,5 мм. Залишкова пористість зразків складала 1,5-2%.

Таблиця 6 – Технологічні параметри отримання зразків

№ п/п	Технологічний параметр	Одиниця вимірювання
1	Сила постійного струму	650 700 А
2	Тиск підпресовування	до 60 МПа
3	Тривалість електроспикання	140-160 с
4	Температура спикання	800-950 $^{\circ}\text{C}$

Рисунок 12 показує проходження процесу усадження зразка за 3 хв під дією спрямленого постійного струму при постійному підпресовуванні у 40-60 МПа. Для систем, що вміщують Cu-Sn число Шервуда для даного процесу складає 1,6-1,8. Це свідчить про прискорене проходження процесів розчинення твердої компоненти (Cu) у рідку фазу (Sn) під дією електричного струму. Таке значення дозволяє проводити процес консолідації при температурах на 300-400  $^{\circ}\text{C}$  нижче ніж зазвичай і скоротити тривалість електрообробки.

Абразивну здатність алмазвміщуючих матеріалів, отриманих на установці ЕРАН 2/1 та у промислових умовах досліджували за допомогою експериментального обладнання, яке дозволяло за методом зішліфовування

відповідно до ГОСТ 25594-83 визначати їх працездатність (ефективність використання).

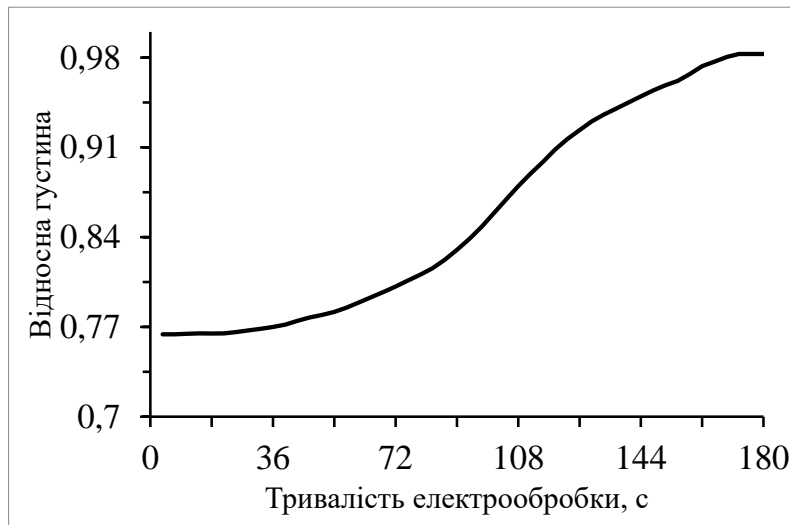


Рисунок 12 – Відносне усадження зразка на основі міді, олова, кобальту, хрому і алмазів

Загальні умови проведення випробувань на визначення працездатності включали загальну тривалість випробування у 90 хв і кожні 15 хв реєстрація результату зменшення маси контртіла, якими були граніт і мармур у формі круглого диска діаметром 180 мм і товщиною 20-23 мм. Одночасно випробувалась партія інструменту в кількості 4 шт. Вигляд початкового стану алмазу, зламу зразків і після випробувань показано на рисунку 13.

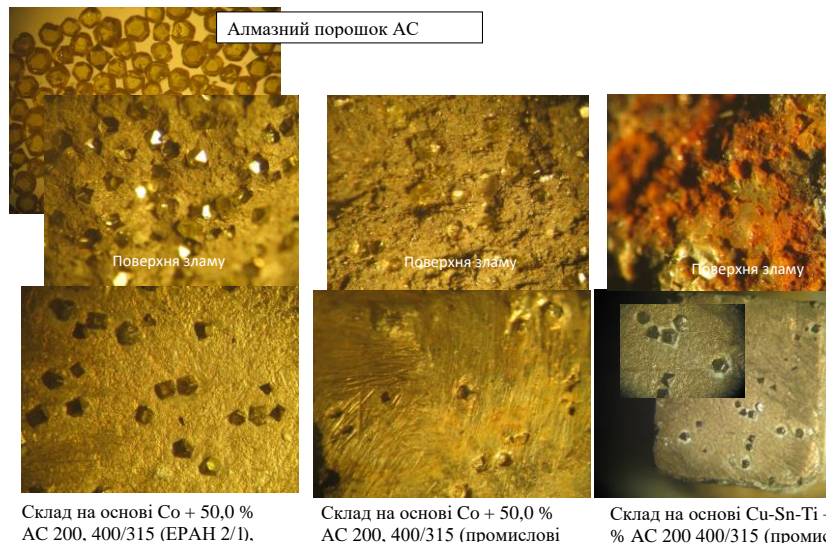


Рисунок 13 – Стан алмазу (початковий і в зразках

Визначені характеристики зразків інструментального призначення, отриманих в роботі алмазвміщуючих матеріалів, були порівняні з існуючими промисловими аналогами (таблиця 7).

Таблиця 7 – Абразивна здатність зразків

Склад (мас.%)	Середня абразивна здатність, г/см <sup>2</sup> хв. При зернистості інструмента 40-50		Шорсткість контртіла після обробки, Ra, мкм	Твердість, HRB	Примітки
	Контртіло – граніт (Головіно)	Контртіло – мармур (Коєлга).			
((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) Отримання ЕРАН 2/1	0,6931	<b>3,0806</b>	2,5-1,25	55-85	Отримано на установці ЕРАН 2/1 за розробленими режимами
Основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	1,0497	1,8353	2,5-1,25	83-87	Серійні промислові сегменти інструментального призначення (ТОВ "ІНСТЕХ" (пресування + спікання))
Склад марки "ТИТАН" (зв'язка М1+10%Ті) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	0,3939	1,2939	2,5-1,25	100-106	Серійні промислові сегменти інструментального призначення (пресування + спікання)

Визначено, що абразивна здатність при обробці мармуру для всіх випробовуваних алмазвміщуючих інструментів була значно вищою, ніж при обробці граніту. Це відбувалося через високу абразивність мармуру, яка сприяла розкриттю (оголенню) абразивних зерен інструменту (над поверхнею зв'язки) і, з іншого боку, підвищеною міцністю граніту, тобто його відомої важкістю щодо обробки інструментом.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі розробленої моделі елементарної комірки, яка пояснює взаємодію по границі переходу поверхня твердого тіла – прошарок рідкої фази, що її оточує за умови безпосереднього проходження постійного електричного струму, реалізовано комплексний підхід по отриманню порошкових високозносостійких матеріалів на основі абразив-металевих систем.

1. Запропоновано модель елементарної комірки двокomпонентної системи типу тверда частинка – розплав на основі якої проведено розрахунки щодо переміщення речовини під дією постійного електричного струму. Розглянуті математичні моделі відображають динаміку переміщення

- розплавленої компоненти під дією електричного струму порошкових об'єктів.
2. Досліджено особливості формування структури при утворенні рідкої фази під час електрообробки композитів на основі олова + 15% жароміцний сплав (4,1%Mo, 5,3%W, 10,9%Cr, 79,7%Ni) та Sn - 15%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Виявлено ефект переміщення в радіальному напрямку частинок твердої фази в розплаві. Визначено, що перерозподіл твердих частинок в об'ємі оброблюваного матеріалу супроводжується збільшенням ступеню їх розчинення в рідкій фазі під дією електричного струму.
  3. Застосовано критерій (число) Шервуда для аналізу проходження процесу спікання в рідкій фазі під дією спрямленого постійного електричного струму. Показано, що критерій Шервуда для систем, які ущільнюються під дією електричного струму і вміщують Cu-Sn складає 1,6-1,8, а для систем Cu-Al та Ni-Al становить 148-462. Проведені розрахунки показують можливість зниження температури процесу консолідації на 300-400 °С при застосуванні спрямленого постійного струму та зменшення часу електрообробки до 3 хвилин для алмаз-металевих композицій інструментального призначення.
  4. Розроблено режими отримання композиційних алмазвміщуючих матеріалів на установці ЕРАН 2/1 в умовах пропускання спрямленого постійного струму. Встановлено, що композиційні матеріали на основі алмаз-металева зв'язка (Cu-Sn-Co-Cr) можуть бути отримані при дії струму густиною у  $8,28 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, тиску 40-60 МПа та загальному часу процесу спікання, що не перевищує 180 с.
  5. На установці ЕРАН 2/1 в умовах пропускання спрямленого постійного струму отримано зразки інструментального призначення на основі алмаз-металева зв'язка (Cu-Sn-Co-Cr) при температурі 950-1050 °С та тривалості процесу 3 хвилини. Проведено тестування по працездатності отриманих алмазвміщуючих матеріалів методом зішліфювання відповідно до ГОСТ 25594-83 по граніту та мармуру. Визначено, що середня абразивна здатність по граніту склала 0,6931 г/см<sup>2</sup> хв., а по мармуру 3,0806 г/см<sup>2</sup> хв., що в 1,7-2,3 рази краще аналогів, де металева зв'язка майже чистий кобальт і отримані в промислових умовах ТОВ "ІНСТЕХ" та сегменти марки "ТІТАН" (склад: зв'язка М1+10%Ti).

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ, ЯКІ ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Raychenko O.I., Popov V.P., Derev'yanko O.V., Istomina T.I., and Repenko A.I. Experiments on Dynamic Behavior of Molten Metal and Solid Particles Under Direct Current Passing // Journal of Materials Synthesis and Processing. – 2002. – V. 10, No 6, Nov. - P. 345-351. (Springer Science, індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1023837903650>) (Особистий

*внесок здобувача: підготував і провів експерименти, написав комплект комп'ютерних програмних компонентів).*

2. Raychenko O.I., **Derev'yanko O.V.** and Popov V.P. Analysis of diffusion from an inclusion in a current-carrying liquid metal // Progress in Computational Fluid Dynamics. - 2004. - V. 4, No 2. - С. 92-98. (індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://doi.org/10.1504/PCFD.2004.003790> ) *(Особистий внесок здобувача: Написав комплект комп'ютерних програм для визначення концентраційних градієнтів та визначення критерія Шервуда).*
3. Raitchenko A.I., Popov V.P., **Derevyanko A.V.** Velocity and Concentration Fields in Current-Carrying Liquid Filling Spherical Layer Space // Magnetic Hydrodynamics. – Latvia. – 1998. – V. 34, No 1. - P. 79-84. (режим доступу: <http://mhd.sal.lv/Download/mydownload.php?ed=r&vol=34&nr=1&an=8&p1=79&p2=67> ) *(Особистий внесок здобувача: розробив алгоритм і написав комплект комп'ютерних програм для проведення розрахунків щодо виникнення електрогідродинамічних течій в об'ємі елементарної комірки відповідно до сферичної геометрії, провів аналіз розрахункових даних).*
4. Raychenko O.I., **Derev'yanko O.V.**, and Popov V.P. Theoretical Consideration of the Two-Dimensional Temperature Field in a Cylindrical Three-Layered Conductive Objects under an Electric Cross-Current // High Temperature Materials and Processes.- 2002. - V. 21, No 6. - P. 337-350. (індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://doi.org/10.1515/HTMP.2002.21.6.337> ) *(Особистий внесок здобувача: отриманий раніше алгоритм змінив відповідно до вирішення задачі в циліндричній системі із урахуванням всього об'єму елементарної моделі, написав комплект комп'ютерних програм).*
5. Raychenko O.I., **Derev'yanko O.V.**, Popov V.P. Calculation of a stationary two-dimensional temperature field, originating with an electroheating of a three-layered cylindrical medium // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – Ukraine. – 1999 - V. 21, № 7. - P. 69-80. *(Особистий внесок здобувача: розробив алгоритм вирішення комплексної задачі, написав комплект комп'ютерних програм, які при проведенні розрахунків щодо поданої моделі дозволили оцінити і показати ступінь перерозподілу струму і температури по прошарку).*
6. Raychenko O.I., **Derev'yanko O.V.**, Popov V.P. Alloy concentration fields resulting on dissolving of solid particle in the surrounding current-carrying liquid metal // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. - Ukraine. – 1999 - V. 21, № 10. - С. 80-83. *(Особистий внесок здобувача: за алгоритмом щодо застосування до сферичної геометрії написав комплект комп'ютерних програмних компонентів для проведення чисельних розрахунків щодо виникнення концентраційних полів в об'ємі*

елементарної комірки та критерієм, що описує ступінь проходження процесів масоперенесення за конвективним типом в залежності від величини електричного струму).

7. Райченко А.И., Попов В.П., **Дерев'янюк А.В.** Перераспределение твердых инородных частиц в жидком металле при пропускании электрического тока // Порошковая металлургия. – Украина. - 2002. - № 7-8. - С. 1-7. (індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021196406973> ) (Особистий внесок здобувача: підготував і провів експериментальні роботи щодо поведінки компонентів при проходженні електричного струму. Отримав алгоритм щодо вирішення задачі з урахуванням моделі поведінки одиної твердої частинки).
8. Райченко А.И., Попов В.П., Дерев'янюк А.В. Сплавообразование в гетерогенной системе под действием электрического тока // Порошковая металлургия. - Украина. - 2003. - № 5-6. - С. 16–20. (індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1025703209130> ) (Особистий внесок здобувача: підготував і брав участь у проведенні експериментів щодо визначення ролі електричного струму на ступінь внутрішніх взаємодій. Використовуючи самостійно написану програму щодо питання, здійснив чисельні розрахунки).
9. **Дерев'янюк А.В.**, Истомина Т.И., Райченко А.И. "Процессы, которые инициируются действием электрического тока" // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. – Україна. - Київ. - № 1 (6), вересень, 2013, С. 96-103. (режим доступу: <http://www.materials.kiev.ua/umrs/ua/html/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA6.pdf> ) (Особистий внесок здобувача: підготував технічний матеріал щодо дії електричного струму, як силового важеля, на формування будови фізичного тіла на основі дисперсного тіла).
10. Лучка М.В., **Дерев'янюк О.В.**, Ковальченко М.С., Кіндрачук М.В. Консолідація непровідних різальних елементів абразивного інструменту // Порошкова металлургия. - Україна. – 2014. – № 5–6. С. 13–22. (індексується Web of Science та SCOPUS, режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9615-1> <http://www.materials.kiev.ua/article/1226> ) (Особистий внесок здобувача: Отримав композиційний матеріал, що включає алмаз і кобальт, з метою отримання заготовок сегментів інструментального призначення).
11. Патент України на винахід №u30731 МПК (2006) C25D 17/00, C25D 15/00 Електролізер для нанесення композиційних електролітичних покриттів / Лучка М.В., Дерев'янюк О.В., Корнієнко А.О.,

Кіндрачук М.В., Ковальченко М.С., Забродський І.М., Мельник П.І.; заявник і патентоволодар Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича. – №200712357; Заявл. 07.11.2007; опубл. 11.03.2008. Бюл. №5. (режим доступу: <https://uapatents.com/3-30731-elektrolizer-dlya-nanesennya-kompozicijnikh-elektrolitichnikh-pokrittiv.html>) (Особистий внесок здобувача: Отримав гранульований матеріал, що включає алмаз із покриттям кобальта, з метою отримання заготовок сегментів інструментального призначення).

### **НАУКОВІ ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ:**

12. Третя міжнародна науково–технічна конференція "Нетрадиційні електромеханічні і електричні системи". Алушта, Крим, Україна, 19–21 вересня 1997. (Райченко А.И., Попов В.П., Буренков Г.Л., Истомина Т.И., Деревянко А. В. Эффекты массопереноса в дисперсных металлических системах под влиянием электрического тока.) (Заочна участь)
13. Міжнародна конференція "Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии" (PM–97). Київ, листопад 1997. (Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко А. В. Сплавление металлического порошка, суспендированного в жидком металле, с жидким металлом при пропускании электрического тока.) (Очна участь)
14. Міжнародна конференція "Fluid Flow Phenomena in Metals Processing" (TMS-99), TMS (Minerals•Metals•Materials). Сан-Дієго, США, 28 лютого – 4 березня, 1999. (Raitchenko A.I., Popov V.P., Derevyanko A.V. Behaviour of the Solid Alloy Particles Dispersed in Liquid Tin under the Electric Current Passage.) (Заочна участь)
15. Міжнародна конференція "Second International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Minerals & Process Industries", CSIRO, (CFD–99), Мельбурн, Австралія, 6–8 грудня, 1999. (Raychenko O.I., Derev'yanko O.V., Popov V.P. Computer Calculations of Diffusion from a Solid Inclusion in the Surrounding Liquid Current-Carrying Metal under Electric Current Action.) (Заочна участь)
16. Міжнародний XXXVII семінар "Актуальні проблеми міцності", 3–5 липня, Київ, 2001. (Істоміна Т.И., Попов В.П., Райченко О.И., Дерев'янку О.В., Безимьянний Ю.Г., Волкогон В.М., Костенко А.Д. Одержання композиційних матеріалів антифрикційного призначення з металічною матрицею та алмазами динамічного синтезу методом електророзрядного спікання.) (Очна участь)



17. Міжнародна конференція "Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике". – Київ, Україна. 8-12 вересня. 2003. (Райченко А.И., Попов В.П., Дерев'янка А.В., Истомина Т.И., Репенко А.И. Исследование динамического поведения расплавленного металла и твердых частиц при прямом прохождении электрического тока.) (Очна участь)
18. Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы". Киев, Украина. 26-30 сентября 2005. (Рагуля А.В., Згалат–Лозинский О.Б., Колесниченко В.Г., Дерев'янка А.В., Замула М. В., Райченко А.И. Электроразрядное спекание нано TiN–AlN.) (Заочна участь)
19. International conference "Clusters and Nanostructured Materials". Abstracts. Uzhgorod, Ukraine. 2006. (Ragulya A.V., Zgalat-Lozynskyi O.B., Kolesnichenko V.G., Derev'yanko O.V., Zamula M.V. Bulk nanocomposites in the system Ti-N-Al consolidated by electro-discharge sintering.) (Заочна участь)
20. 6th International conference "HighMathTech 2019". October 28-30, Kyiv, Ukraine, 2019. (Derev'yanko O. V., Zgalat-Lozynskyi O. B. Consolidation of powder materials based on diamond and ceramic-metal systems under electric current action".) (Очна участь)
21. 7th International Samsonov Conference "Materials Science of High Melting Compounds" (MSHMC). – May 25-28, Kyiv, Ukraine, 2021. (Derev'yanko O.V., Istomina T.I., Vasylykivska M.A., Karpets M.V. "Working capability of the tool for the processing of non-useful materials manufactured by spark plasma sintering (SPS)".) (Очна участь)

**Які додатково відображають наукові результати дисертації:**

22. Патент України на винахід №79526 МПК (2006) B22F 3/14 Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі нітриду титану / Петухов О.С., Дерев'янка О.В., Рагуля А.В., Райченко О.І., Скороход В.В., Попов В.П.; заявник і патентоволодар Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М Францевича. – №а200507473; Заявл. 27.07.2005; опубл. 15.02.2007. Бюл. №9.
23. Патент України № 70138. МПК С25Р 17/00 С25Р 15/00 Спосіб композиційної консолідації непровідних ріжучих елементів абразивного інструменту // М.В Лучка., О.В. Дерев'янка, М.П. Сав'як.; заявник і патентоволодар Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М Францевича. – №u201114028; Заявл. 28.11.2011; Опубл. 25.05.2012; Бюл. № 10.
24. Патент України № u2019 05064. Спосіб виготовлення заготовок різальних інструментів із порошків швидкорізальних сталей /

Гогаєв К.О., Радченко О.К., Дерев'янка О.В.; Заявл. 13.05.2019; Опубл. 26.12.2019; Бюл. № 24.

## АНОТАЦІЯ

**Дерев'янка О.В. Особливості сплавоутворення при консолідації порошкових матеріалів на основі абразив-металевих систем під дією електричного струму.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 "Порошкова металургія і композиційні матеріали". – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, 2021.

Робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі по розробці та дослідженню, що є сьогодні вельми актуальним, умов отримання, та досягнення властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі системи алмаз – металева зв'язка на основі Cu-Sn-Co-Cr інструментального призначення, що отримані при пропусканні спрямленого постійного струму. Проведений аналіз процесів, що виникають в елементарній комірці.

Розроблено математичні моделі, що пояснюють процеси взаємодії по межі переходу поверхня твердого тіла – прошарок рідкої фази, що її оточує в дисперсному тілі за умови безпосереднього проходження постійного електричного струму. Сформульовано науково-практичні підходи по спіканню порошкових високозносостійких матеріалів на основі алмаз-металевих компонентів.

Розроблено технологічну схему виготовлення композиційних матеріалів на основі системи алмаз – металева зв'язка на основі Cu-Sn-Co-Cr інструментального призначення, що отримані при пропусканні спрямленого постійного струму. Досліджено процеси їх структуроутворення, фізико-механічні властивості та визначено працездатність по тілам обробки (граніт, мармур).

**Ключові слова:** Спікання, постійний струм, алмізвміщуючий інструмент, критерій Шервуда, абразивна здатність, порошкові високозносостійкі матеріали.

## АННОТАЦИЯ

**Дерев'янка А.В. Особенности сплавообразования при консолидации порошковых материалов на основе абразив-металлических систем под действием электрического тока.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 "Порошковая металлургия и композиционные материалы». - Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2021.

Работа посвящена решению научно-технической задачи по разработке и исследованию, что есть сегодня весьма актуальным, условий получения и достижения свойств порошковых композиционных материалов на основе системы алмаз - металлическая связка на основе Cu-Sn-Co-Cr инструментального назначения, полученные при пропускании выпрямленного постоянного тока. Проведен анализ процессов, возникающих в элементарной ячейке. Разработано математические модели, объясняющие процессы взаимодействия по границе перехода поверхность твердого тела - слой жидкой фазы, что его окружает в дисперсной теле при условии непосредственного прохождения постоянного электрического тока. Сформулированы научно-практические подходы по спеканию порошковых высокоизносостойких материалов на основе алмаз-металлических компонентов.

Разработана технологическая схема изготовления композиционных материалов на основе системы алмаз - металлическая связка на основе Cu-Sn-Co-Cr инструментального назначения, полученные при пропускании выпрямленного постоянного тока. Исследованы процессы их структурообразования, физико-механические свойства и определены работоспособность по телам обработки (гранит, мрамор).

**Ключевые слова:** Спекание, постоянный ток, алмазосодержащий инструмент, критерий Шервуда, абразивная способность, порошковые высокоизносостойкие материалы.

## ANNOTATION

**Derev'yanko O.V. Features of alloying during the consolidation of powder materials based on abrasive-metal systems under electric current action. –**

The qualification scientific work presented as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.16.06 "Powder metallurgy and composite materials." - Institute for Problems of Materials Science named after I. N. Frantsevich of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2021.

The work is devoted to solving a scientific and technical problem on the development and research, which is very relevant today, the conditions for obtaining and achieving the properties of powder composite materials based on the diamond-metal binder based on Cu-Sn-Co-Cr for instrumental purposes, obtained by passing a rectified direct current. The analysis of the processes occurring in the unit cell is carried out. Mathematical models have been developed that explain the interaction processes along the transition boundary between the surface of a solid body and a layer of a liquid phase that surrounds it in a dispersed body under the condition of direct passage of a direct electric current. Scientific and practical approaches to sintering of powder high-wear-resistant materials based on diamond-metal components are formulated.

A technological scheme for the manufacture of composite materials based on the system diamond - metal binder based on Cu-Sn-Co-Cr for instrumental purposes,

obtained by passing a rectified direct current, has been developed. The processes of their structure formation, physical and mechanical properties have been investigated, and the working capacity of the processing bodies (granite, marble) has been determined.

**Key words:** Sintering, direct current, diamond-containing tool, Sherwood criterion, abrasive ability, powder high-wear materials.