

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

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

Дерев'янку Олександр Васильович

УДК 621.762.5:621.762.660.2:669:532.6:541

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.15.06 – "Порошкова металургія та композиційні матеріали"
Технічні науки (13 Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Дерев'янку
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: **Райченко Олександр Іванович**, д.т.н., професор, гол.н.с.
Згалат-Лозинський Остап Броніславович, д.т.н., с.н.с.

Київ 2021

АНОТАЦІЯ

Дерев'янюк 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 та композиційні матеріали" (13 Механічна інженерія) – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі по дослідженню процесів масообміну та взаємодії між поверхнею твердої частинки та прошарком, що утворює рідка фаза (розплав), що її оточує під дією електричного струму при отриманні композиційних матеріалів з металевою компонентою та розробці з метою отримання композиційних матеріалів інструментального призначення, що вміщують алмаз та металеву зв'язку складу Cu-Sn-Co-Cr, при температурах 500-1200 °С при малій тривалості самого процесу (всього до 3 хв) під дією спрямленого постійного струму.

Розроблено математичні моделі на макро- і мікрорівнях, 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 високо зносостійких матеріалів на основі алмаз-металевих компонентів під дією спрямленого постійного електричного струму.

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

Наукова новизна одержаних результатів

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 одержаних результатів

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.

Ключові слова: Спінання, постійний струм, алмазвміщуючий інструмент, критерій Шервуда, абразивна здатність, порошкові високозносоустійкі матеріали.

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." (13 Mechanical engineering) - 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.

Scientific novelty of the obtained results

1. For the first time, the model of elementary cell, which describes the laws of interaction between the components of metal compound (Cu-Sn, Ni-Al) in powder materials based on abrasive-metal systems at the boundary of the surface transition of a solid particle - surrounding liquid phase (melting matrix) under electric current action.

2. For the first time, for the determination of level mass transfer processes from surface of particle in to surrounding liquid phase and for optimization of the regimes for obtaining diamond-containing composite materials on metal-base under electric current action Sherwood's criterion was used

3. For the first time, the effect of displacement of solid components in the metal binder under electric current action was found, but it start is take place at the value of the Rayleigh criterion of 62.2-78.7 in contrast to its value in 1707 when using traditional methods of consolidation of powder materials.

The practical significance of the obtained results

1. The author's algorithms for calculating the speed of movement and directions of distribution of the molten substance around the powder particle, as well as determining the degree of alloying processes between components under electric current action can to reduce the duration and temperature of the process of consolidation of abrasive-metal materials, which saves energy resources up to 20%.

2. On the basis of the theoretical and experimental researches carried out by the author the modes of making of diamond-containing composites on the basis of copper-tin-cobalt under electric current action were developed. The obtained materials were tested at "SPC AGROPROMDETAL" LLC (act of December 22,

2020) and recommended for the manufacture of instrumental segments for treatment non-metallic materials.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані 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&p](http://mhd.sal.lv/Download/mydownload.php?ed=r&vol=34&nr=1&an=8&p1=79&p2=67)

[2=67](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., **Деревянко 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 одиначної твердої частинки*).

8. Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко 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'яно 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'яно О.В.,** Ковальченко М.С., Кіндрачук М.В. Консолідація непровідних різальних елементів абразивного інструменту // Порошкова металургія. - 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'яно 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. <https://uapatents.com/3-30731-elektrolizer-dlya-nanesennya-kompozicijnikh-elektrolitichnikh-pokrittiv.html>)

(Особистий внесок здобувача: Отримав гранульований матеріал, що включає

алмаз із покриттям кобальту, з метою отримання заготовок сегментів інструментального призначення).

Матеріали наукових конференцій:

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., Дерев'янку 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., Дерев'янку 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'янку 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'янку 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-Lozynskyy 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-Lozynskyy 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'янку 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'янко, 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'янко О.В.; Заявл. 13.05.2019; Опубл. 26.12.2019; Бюл. № 24.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБКИ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АБРАЗИВ-МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ ТА ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОХОДЯТЬ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ	27
1.1. Методи консолідації з використанням дії електричного струму	28
1.2. Фізичні явища, які продукуються дією електричного струму	37
1.3. Приклади продукції інструментального призначення, які отримують при застосуванні дії електричного струму	47
1.4. Висновки до розділу 1 та формулювання завдань.....	48
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	50
2.1. Об'єкти дослідження	50
2.2. Обладнання та умови проведення експериментів	53
2.3. Конструкція прес-інструмента для експериментальних досліджень.....	55
2.4. Методика обробки зразків та одержання результатів.....	57
РОЗДІЛ 3 ПЕРЕМІЩЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ ТІЛАХ ПІД ЧАС КОНСОЛІДАЦІЇ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.....	62
3.1. Динамічні ефекти навколо твердої поверхні порошкової частинки	62
3.2. Модель елементарної комірки порошкового тіла, що обмежена у просторі	74
3.3. Визначення критерія Шервуда для оптимізації умов отримання амазвміщуючого матеріалу під дією електричного струму	102
3.4. Висновки по розділу 3	110
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ АЛМАЗ-МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ, ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.....	111

4.1 Інтенсифікація взаємодії між складниками металевої зв'язки під дією електричного струму	111
4.2. Переміщення твердих частинок металевої зв'язки під дією сил електричної природи.....	119
4.3. Ініціація взаємодії між твердою поверхнею порошкової частинки і розплавленою компонентою під дією електричного струму	125
4.4. Висновки по розділу 4	132
РОЗДІЛ 5 ОТРИМАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ АЛМАЗ-МЕТАЛЕВА ЗВ'ЯЗКА.....	135
5.1 Отримання композиційного матеріалу під дією постійного струму....	135
5.2 Рентгеноструктурні дослідження алмазвміщуючих матеріалів за різних умов отримання	141
5.3. Експериментальна перевірка алмазвміщуючого матеріалу інструментального призначення, аналіз отриманих результатів	144
Висновки по розділу 5.....	155
ВИСНОВКИ	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	158
ДОДАТКИ	176
Додаток А.....	176
Додаток Б	177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕРС – Електро-Розрядне Спікання

ІПС – Іскро-Плазмове Спікання

Nu_g – дифузійне число Нуссельта

Sh – число (критерій) Шервуда (Sherwood's number)

ϑ – величина кута, [град]

i – тверда частинка

e – струмопровідний прошарок

λ_n – електропровідність n -го компонента, [1/(Ом м)]

c_n – питома теплоємність n -го компонента, [Дж/(кг К)]

ρ_n – щільність n -го компонента, [кг/(м³)]

k_n – теплопровідність n -го компонента, [Вт/(м К)]

a_n – температуропровідність n -го компонента, [м²/с]

η – динамічна в'язкість розплавленої речовини, [Па·с]

ν – кінематична в'язкість розплавленої речовини, [м²/с]

U – швидкість переміщення речовини на значному віддаленні (умовна величина) від поверхні

r_i – радіус частинки, [м]

r – товщина оточуючого прошарку, радіус-вектор (радіальна координата), [м]

i_r, i_φ – орти

λ_i – електропровідність твердої частинки, [1/(Ом м)]

λ_e – електропровідність оточуючого прошарку, [1/(Ом м)]

v – швидкість, [м/с]

v_r – радіальна компонента швидкості, [м/с]

v_g – тангенціальна компонента швидкості, [м/с]

V_g та V_r приведена швидкість переміщення

C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі від інтегрування, що залежать від r, k, A і їх вигляд визначається на основі відповідних граничних умов

J_0, \mathbf{J} – величина густини електричного струму на деякому віддаленні, [A/(м²)]

k – коефіцієнт комірки

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м = $1,26 \times 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала

μ_e – магнітна відносна проникність розплавленої речовини $\cong 1$

p – тиск, [Па]

\mathbf{B} – магнітна індукція, [Тл]

ρ_i – щільність твердої частинки, [кг/м³]

ρ_e – щільність розплавленої компоненти, [кг/м³]

$\mathbf{F}_r \mathbf{i}_r$ – квазіархімедова сила (сила електромагнітного виштовхування, що діє на чужорідну частинку), [Н]

$\mathbf{F}_{z1} \mathbf{i}_z$ – сила, що "топить" частинку ($\rho_i > \rho_e$), [Н]

$\mathbf{F}_{z2} \mathbf{i}_z$ – сила, що викликає "спливання" частинки ($\rho_i < \rho_e$), [Н]

$K = -\frac{3}{2} \frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i}$ – коефіцієнт електромагнітного виштовхування

\mathbf{F}_L – об'ємна сила Лоренца, [Н]

c – концентрація, тобто кількість речовини в одиничному об'ємі, що дифундує з визначеної площі поверхні, [%]

$c_s = c|_{r=r_i}$ – концентрація речовини на поверхні, [%]

c_0 – концентрація речовини в глибині оточуючого прошарку, [%]

D, D_0 – коефіцієнт звичайної (стаціонарної) атомної дифузії з поверхні, [см²/с]

β_s – коефіцієнт температурного розширення

h – висота, [м]

Q – енергія активації, [Дж/моль]

T – температура, [К]

$\Gamma(x)$ – гамма функція

$E(\alpha, \beta), F(\alpha, \beta)$ – еліптичні функції 1^{го} і 2^{го} роду відповідно

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з найважливіших напрямків розвитку високих технологій є створення нових композиційних матеріалів з відповідними механічними та різноманітними фізичними й хімічними властивостями. Для прогнозування умов створення та експлуатації композиційних матеріалів необхідно мати уявлення щодо фізико-хімічних процесів, які відбуваються при їх виготовленні чи додатковій обробці виробу.

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 Спінання (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. Ці, а також деякі інші варіанти обробки дисперсних матеріалів, по суті є сімейство методів консолідації під дією електрики. З метою отримання композиційного матеріалу із очікуваними властивостями у матрицю, що плавиться, зазвичай заздалегідь вводяться легуючі елементи у вигляді порошку, твердих дрібних частинок різноманітної геометричної форми. Вивчення процесів масообміну між поверхнею твердої частинки та прошарку речовини, що оточує, визначення механізмів розчинення та взаємодії є одним з головних завдань пропонованої роботи.

На момент постановки задачі роботи у світі вже є створені основні теоретичні і практичні принципи формулювання питання і шляхи реалізації ідеї при використанні традиційних розрахункових методів і підходів з метою здійснення обчислень ефектів, які породжує електромагнетизм в дисперсних

одно- і багатокомпонентних тілах. Але незважаючи на великий світовий доробок щодо питання про застосування дії електричного струму на порошкову композицію, воно потребує подальшого вивчення, особливо враховуючи потребу сьогодення у нових композиційних матеріалах на основі тих матеріалів, які фактично неможливо отримувати, використовуючи традиційні техніко-технологічні рішення і напрацювання. Спонування вирішення питання дозволить скоротити час отримання одиниці виробу, час та загальний температуру технологічного режиму і габарити необхідного промислового обладнання.

За умов, що торкаються ефектів початкового змочування та взаємної розчинності між компонентами, будуть відбуватися природні процеси розчинення поверхні твердої частинки в речовині прошарку, що оточує, за механізмом звичайної атомної дифузії та проходять процеси внутрішніх взаємодій, що включають процеси сплавоутворення під дією звичайного температури. Величина проходження звичайної атомної дифузії завжди була лімітуючим фактором при проходженні процесів взаємодії поверхні твердої частинки і речовини прошарку. Щоб збільшити швидкість протікання внутрішніх взаємодій, необхідно зазвичай підвищувати температуру в цілому, збільшувати час технологічного процесу чи додатково вводити активатори для посилення хімічних взаємодій між складниками оброблюваного композиційного матеріалу. Використання дії підвищених температур чи подовження часу технологічного процесу буває не завжди бажаним. Наприклад, при виробництві алмазвміщуючих сегментів інструментального призначення, при перевищенні рівня температури 700°C зерна алмазу можуть почати графітізуватися з поверхні, що при подальшій експлуатації призводить до зниження загального рівня працездатності робочої контактної поверхні сегменту інструмента в цілому.

З іншого боку при отриманні композиційних матеріалів на основі оксидів, карбідів, боридів чи нітридів металів із застосуванням методів традиційної металургії виникають деякі труднощі у здійсненні технологічного процесу.

Основна причина – це необхідність досягнення достатньо високих температурних рівнів для початку процесу оплавлення поверхонь компонентів. При температурних рівнях від 1800 °С однозначно необхідно застосовувати захисне середовище. Та й матеріал прес-інструменту повинен бути інертно-нереакційним до компонентів дисперсного тіла та захисної оболонки. А наявність в тілі металевої матриці, що плавиться, твердих частинок 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 відносно 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.

На практиці незалежно від механізму підводу теплової енергії до дисперсного тіла – непрямому нагріванні чи прямому проходженні електричного струму крізь дисперсний матеріал, завжди виникає нерівномірний прогрів внутрішнього об'єму.

Це призводить до появи різного ступеня температурних перекосів та термопружних явищ. У свою чергу неоднорідності в полях, що виникають, генерують направлені градієнти різноманітної природи по об'єму дисперсного тіла, а разом із ними, як наслідок, – появу рушійних сил об'ємної природи. До

них може також додаватися і енергія, що виділяється від проходження електричного струму, якщо такі додаткові умови можуть бути присутні.

Розкриття закономірностей і механізмів масообмінних процесів дозволить більш повно визначити спектр процесів, що відбуваються на межі переходу поверхня твердої частинки – об'єм прошарку струмопровідної речовини, що оточує поверхню твердої частинки та еволюцію процесу масообміну поверхні твердої частинки із розплавленою компонентою, встановити природу їх виникнення. У свою чергу це дозволить більш активно регулювати хід процесів під дією електричних явищ, наприклад, уповільнювати чи прискорювати швидкість проходження та формування структури і тіла композиційного матеріалу, змінюючи за потреби, умови самого технологічного процесу.

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 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 залізовуглецевих та нікелевих сплавів, армованих високомодульними сполуками з карбідів (карбоборидів) титану та вольфраму для отримання високотносостійких 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 (ИММ) ім. Ф.Н. Тавадзе АН Грузії та Грузинським Технічним Університетом (ГТУ) мін. освіти Грузії.

Мета і завдання 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 високозносоустійких 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 – розплавлена компонента, що оточує (рідка фаза) при отриманні під дією постійного електричного струму порошкових високозносоустійких 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 комірки, 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 комірки 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 одержаних результатів

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 одержаних результатів

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 спрямованого 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 вклад 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.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБКИ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АБРАЗИВ-МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ ТА ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОХОДЯТЬ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Відомо, що склад, структура та властивості багатьох композиційних матеріалів визначаються статичними і динамічними факторами, які пов'язані також і із змочуванням між компонентами дисперсного тіла та іншими поверхневими явищами. При виготовленні композиційних матеріалів звичайно відбуваються спонтанні події типу гідродинамічних під час розрідження металів у просторі між порошковими частинками та порах. Проте, як показано теоретично та завдяки експериментам, при застосуванні дії електричного струму на вихідні дисперсні композиції вдається суттєво прискорити взаємодію між компонентами [1, 2].

В порошковій металургії вихідними об'єктами після застосування процесу спікання чи додаткової термічної обробки є вироби, які насамперед вміщують у собі твердофазні багатокомпонентні композиції із дисперсною структурою, наприклад, карбіди вольфраму, титану, бору, алмаз, корунд, чи нітриди титану, алюмінію, бору. Поява рідкої фази при нагріванні, наприклад, в процесі консолідації, в більшій мірі пов'язана із плавленням більш легкоплавкого компонента, структурної складової матеріалу, або утворюваного евтектичного складу. Процес плавлення також може бути пов'язаним із плавленням в зоні контактів порошинок, коли рідка фаза виникає при загально вимірюваній температурі, що є нижчою, ніж температура плавлення самого легкоплавкого компонента в дисперсній суміші. При цьому механізм консолідації в присутності рідкої фази принципово залежить від характеру накреслення діаграми стану щодо відповідної багатокомпонентної системи. [3].

В присутності рідкої фази істотно збільшується швидкість процесів самої гетеродифузії. Цим полегшується переміщення твердих частинок одна відносно іншої, сприяючи заповненню пор розплавленою речовиною. У зв'язку із цим можна забезпечити отримання практично безпористих виробів. Ступінь

ущільнення дисперсного тіла буде істотно більшою, ніж при твердофазному спіканні в багатокомпонентних композиціях, коли кількість розплавленого компоненту складатиме більше 0,5%.

Взагалі розрізняють [4]:

- спікання з рідкою фазою, яка зникає незабаром (хоча нагрівання продовжується) із подальшим її розчиненням в твердій фазі, або утворенням з її участю будь-яких більш тугоплавких фазових угруповань,

- спікання з рідкою фазою, яка присутня до кінця ізотермічної витримки після нагрівання.

У будь-якому випадку об'єм рідкої фази, що утворюється в процесі нагрівання, повинен складати від 3-5 до 50% (оптимально 25-35%). Якщо рідкої фази буде більше 50% за об'ємом, то при спіканні може змінитися форма заготовки. При надмірно малій кількості рідкої фази не можна взагалі повною мірою використати всі переваги консолідації, оскільки доля розплавленої компоненти буде недостатньою для забезпечення необхідної активації протікання процесів взаємодій та формування структурного каркасу під час нагрівання дисперсного тіла [4].

1.1. Методи консолідації з використанням дії електричного струму

Останніми роками традиційний технологічний прийом порошкової металургії – пресування з подальшим спіканням в печах – все частіше замінюється на продуктивніші і ефективніші методи, в яких є можливість одночасно використовувати процеси пресування і спікання. Використання дії електричного струму і одночасного механічного навантаження з метою реалізації технологічних потреб при консолідації може істотно покращити якість продукції замість двостадійної технологічної лінії - попереднє пресування + спікання в печах. Методика комплексної дії більш короткочасна, вимагає менших витрат енергії і праці, дозволяє вивільняти виробничі площі, зайняті потужним і одночасно громіздким устаткуванням. Їх застосування дає

можливість виготовляти вироби з таких дисперсних тіл, як порошок алюмінію, або з композиційних сумішей, що містять високотемпературні добавки чи компоненти, які піддаються обробці тільки за великих енергетичних витрат традиційними методами порошкової металургії.

Залежно від режиму зовнішнього механічного навантаження, що звичайно погоджується з електричним навантаженням, процес спікання може проходити по-різному [1, 2, 5]. Можна навести деякі більш використовувані у світі варіанти, які в тій чи іншій мірі підпадають під категоризацію щодо процесів консолідації порошкового матеріалу під дією електричного струму. Але часто практично однакові технологічні процеси носять різні найменування [5, 6, 7], що пов'язано передусім із способом технічної реалізації методу.

Інколи методи спікання під дією електрики мають одну назву, але використовують різні форми електричного сигналу. Рисунок 1.1 показує приблизний розподіл назв методів електрообробки по використовуваній формі електричного сигналу [5, 8, 9].

Принциповою відмінністю методів спікання дисперсних матеріалів під дією електромагнітних сил від традиційних технологій є достатня концентрація високої щільності енергії, що виділяється в основному в контактних областях просторових проміжків між частинками порошку.

При цьому істотна дія на процес консолідації і властивості отримуваних матеріалів мають наступні фактори:

- 1) швидкість введення електричної енергії,
- 2) просторовий розподіл енергії протягом процесу спікання,
- 3) характер і величина механічного навантаження (створення об'ємного обтиснення), прикладеного до порошкового матеріалу.




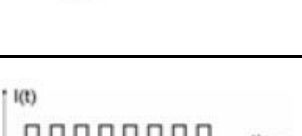
Найменування метода консолідації	Форма лінії струму	Частота Густина струму Тривалість	Похідні матеріали
Постійним струмом (EC, RS)		відсутня 1-10 кА/см ² більше 10 ³ с	Електропровідні і неелектропровідні (метали, кераміка, композити і полімери)
Постійним пульсуючим струмом (EPC, PAS, SPS, FAST)		10 ² -10 ⁸ Гц 1-100 кА/см ² Більше 10 ³ с	Електропровідні і неелектропровідні (метали, кераміка, композити і полімери)
Змінним струмом високовольтного розряду (EIC, EPI, EDC)		10 ² -10 ⁵ Гц ~100 кА/см ² 10 ⁻⁵ -10 ⁻³ с	Електропровідні (метали, електропровідна кераміка, композити із електропровідними складниками)
Змінним пульсуючим струмом (EPC)		50-60 Гц 1-100 кА/см ² 10 ⁻¹ -10 ² с	Електропровідні і неелектропровідні (метали, кераміка, композити і полімери)

Рисунок 1.1 - Способи спікання під дією електричного струму[8]

Загальна схема прикладання електричного навантаження на порошкове тіло, що прийнята в світі, показана на рисунку 1.2. Висока концентрація енергії в зоні контактних переходів, особливо між поверхнями частинок, переводить речовину порошків з твердого стану в частково розплавлений і, при відповідних умовах, можливим може бути частковий перехід в плазмовий стан речовини на дуже короткий час. Відповідно до початкового розташування порошкових частинок перед початком електроспікання, як зображено на рисунку 1.3, первинне проходження електричного струму буде здійснюватися через зони безпосереднього контактоутворення [1, 10, 11].

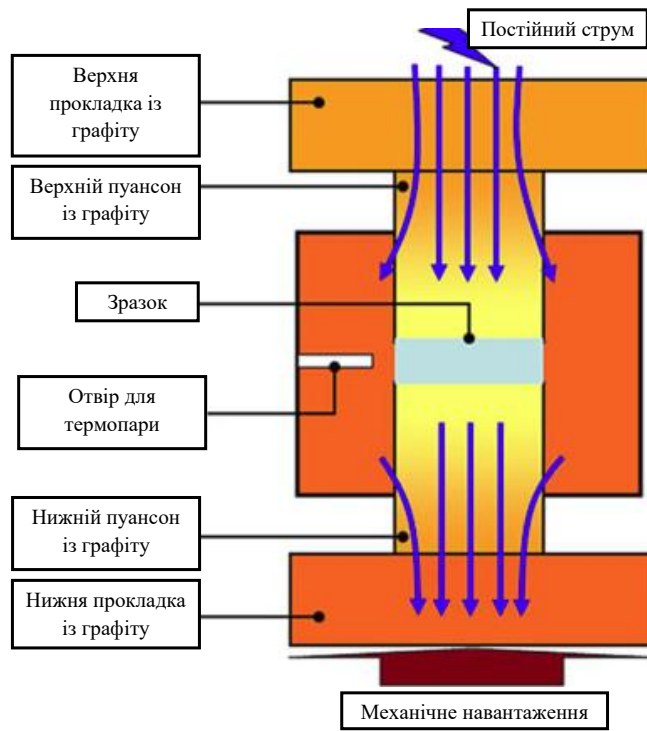


Рисунок 1.2 – Схематичний розріз прес-інструмента [9]

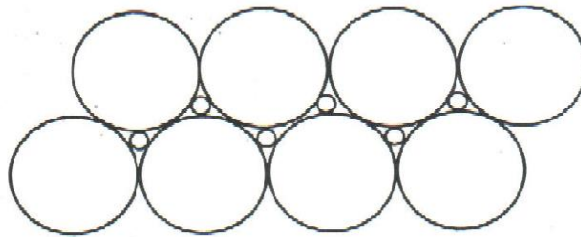


Рисунок 1.3 – Порошкова засипка до моменту ущільнення [1]

Процеси масоперенесення при спіканні під дією електричного струму в контактних зонах характеризуються високою просторовою неоднорідністю і нестаціонарністю в часі і виникають під дією електрофізичних чинників [12]. Широкий діапазон зміни електро-механо-фізичних параметрів дії в основному обумовлює численність способів консолідації композиційного матеріалу[5, 8].

Виходячи із загальних міркувань з метою здійснення процесу консолідації композиційного матеріалу можливо використовувати енергію електричної природи від достатньо ємкого конденсатора, батареї конденсаторів чи від потужного трансформатора, який під'єднано до електричної мережі або ж якого-небудь генератора. Залежно від рівня параметрів джерела електричної

енергії під час обробки можуть виникати, або ж не виникати міжчастинкові контактні явища, або ж виникати локальні електричні розряди. Велике значення має початкова фаза першої стадії процесу, коли відбувається явище іскріння і енерговиділення буде сконцентроване переважно у контактних зонах між порошковими частинками (рисунки 1.2, 1.4) [13, 14, 15, 16].

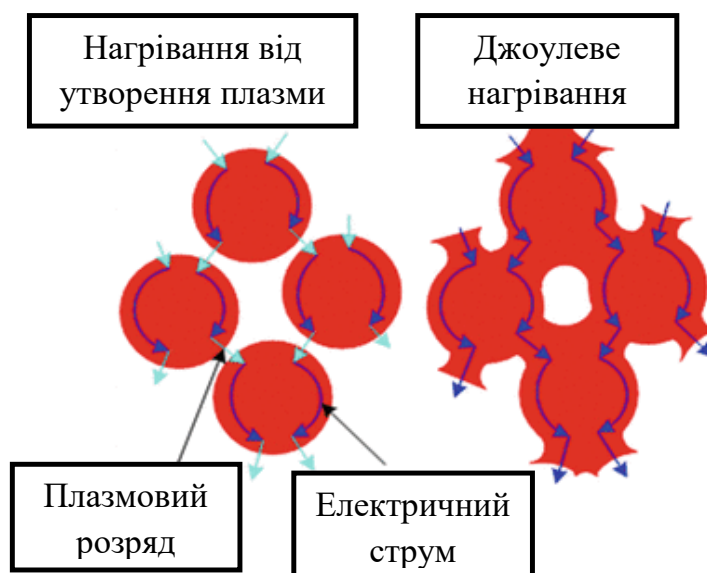


Рисунок 1.4 – Накреслення проходження струму крізь контактні області [15]

Ефект іскріння викликає руйнування поверхневих оксидних плівок із наступним швидким розігріванням приповерхневих ділянок в контактних зонах (рисунок 1.5) і починає проходити процес припікання, як це показано в [17].

Практика має таке підтвердження коли при спіканні під дією електричного струму проходить спочатку первинна побудова перешийків між частинками (рисунок 1.6) [18]. Тут може мати значення і тиск механічного пресування, тиск газового середовища, наявність на поверхні частинок будь-яких домішок або конденсату. Завдяки розплавленню речовини порошинки поблизу багатьох взаємоконтактних областей здобувають можливість "ковзати" одна відносно одної.

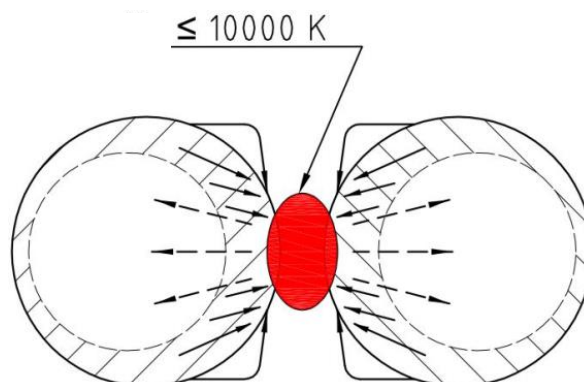
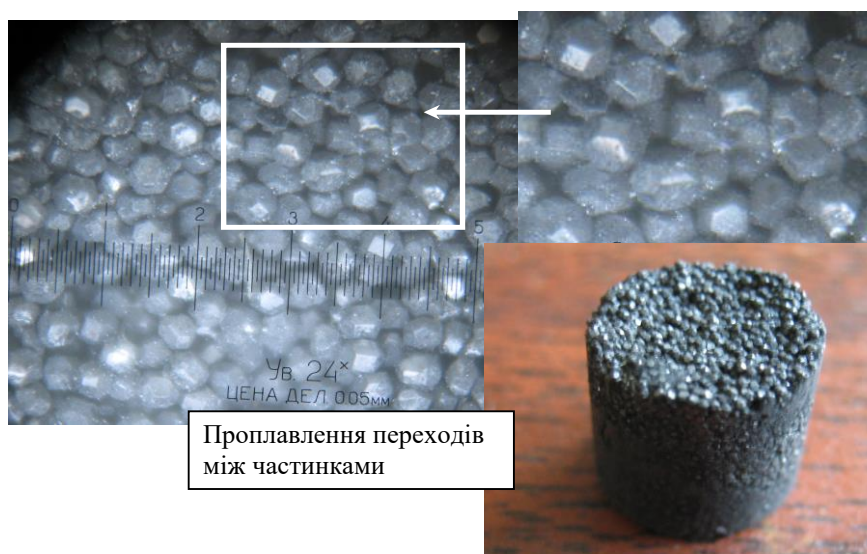


Рисунок 1.5 – Модель припикання із формуванням каркасу завдяки розплавленню компонентів в зоні контакту [17].

Під зовнішнім механічним навантаженням відбувається їх перерозподіл в об'ємі заготовки таким чином, який має своїм наслідком загальне підвищення щільності виробу.



Проплавлення переходів між частинками

Рисунок 1.6 – Формування первинною структури порошкового тіла [18].

Проведені дослідження щодо впливу енергії, яка виділяється в дисперсному тілі під час проходження електричного струму на процес консолідації дозволили встановити, що енерговиділення залежить від загального об'єму пресовки, розміру частинок і хімічного складу композиту. Разом з максимально допустимою електричною енергією важливим чинником є тривалість дії електричного струму. Зменшення тривалості дії електричного

імпульсу від проходження струму менше ніж 30 мкс призводить до переваження скін-ефекту. Збільшення тривалості дії електричного імпульсу понад 50 мкс спричинює посилення ролі пінч-ефекту. Внаслідок цього відбувається процес розплавлення деякої кількості речовини зразка при нижчих значеннях енергетичної дії [19, 20].

Максимальне значення міцності виробу досягається при застосуванні тривалості дії імпульсу електричного струму від 30 до 50 мкс [21]. У цьому діапазоні співвідношення скін- і пінч-ефектів виявляється найоптимальнішим і процес консолідації композиційної суміші може відбуватися рівномірно по всьому об'єму.

При отриманні продукту з пористою структурою тиск механічного навантаження взагалі істотно не підвищують. Для отримання продукту з малою пористістю або ж безпористого прикладають достатньо високий рівень механічного навантаження з метою створення відповідного тиску всередині тіла пресовки. Весь цикл процесу може продовжуватися від 0,1 секунди до декількох хвилин [22].

Основна різниця для технологій ґрунтується на тому, що у випадку технології спікання під дією електричного струму можливе проходження електричного струму як тільки через порошкову пресовку (або через засипаний порошок), або через попередньо спресовану заготовку і частково через провідний прес-інструмент (частіше графітовий). При спіканні за технологією гарячого пресування електричний струм, проходить частково крізь порошкову заготовку і частково крізь електропровідний прес-інструмент. Таким чином і досягається температура спікання. Взагалі сам процес спікання під дією електричного струму виконується при використанні діаграмної площини електричний струм – час, а, наприклад, процес гарячого пресування виконується в координатній сітці температура – тиск пресування від створюваного механічного навантаження. На додаток можна сказати, що тривалість процесу ЕРС дорівнює приблизно 60-180 с, а час гарячого пресування 420-900 с (від 7 до 15 хв). Тобто можна сказати, що витрати

електроенергії на отримання одиниці виробу , наприклад сегментів на основі алмаз-абразивної складової із металічною зв'язкою (виготовлення алмазвміщуючого інструменту), дорівнює 0,16 кВт г/шт, в той час як аналогічна характеристика для технології гарячого пресування становить від 0,56 кВт г/шт [23]. Таким чином з наведеного співставлення витікає, що виробництво за технологією при спіканні під дією електричного струму, яка розроблена в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, має переваги щодо технічної ефективності способу при понижених енерговитратах і тривалості теплової дії на порошкову композиційну суміш та збільшення працездатності виробів інструментального призначення, наприклад, що вміщують алмаз (таблиця 1.1) [24, 25].

Таблиця 1.1 - Збільшення працездатності алмазвміщуючого інструменту при використанні технології спікання під дією електричного струму [26]

№ п/п	Технологія виготовлення	Твердість HRB	Концент. алмазної фази у зв'язці М2-01, %	Зернистість алмазу АС 20, мкм	Відносна швидк. ковзання, м/хв	Знімання скла, г/см ² год	Відносне збільш. продуктивності		
1	Шліфування (таблетки)	ГП – Гаряче Пресування	60 - 65	75	125/100	1000	4.2	1.42	
		ЕРС – Електро-Розрядне Спікання	70 - 75	75	125/100	1000	6.0		
		ГП	70 - 75	100	160/125	1000	3.8		2.02
		ЕРС	70 - 75	100	160/125	1000	7.7		
2	Фрезерування (пластини)	ГП	90	100	160/125	1000	20.6	3.08	
		ЕРС	95	100	160/125	1000	63.5		
		ГП	80	100	400/315	1000	27.5	3.16	
		ЕРС	95	100	400/315	1000	87.0		

Регулюючи технологічні параметри електромеханічного навантаження, насамперед рівень механічного навантаження на першій стадії процесу,

можливо регулювати фізико-механічні властивості кінцевого продукту. Так для матеріалів інструментального призначення, наприклад для інструменту, що вміщує алмаз-абразив на основі мідних і алюмінієвих зв'язок, встановлено – підвищення величини підпресовування на 1-й стадії від 3,3 до 100 МПа в результаті дає більше навантаження на видалення розплавленої речовини із зони електроконтакту і об'ємна температура зменшується в 1,5 рази, також знижується ударна в'язкість і твердість в 1,6 та 2,7 рази відповідно [27].

При використанні технології спікання під дією електричного струму порошкові композиційні матеріали можуть змінювати свій фазовий і металографічний склад не за правилами як для врівноважених двох- і багатокомпонентних систем. Під час процесу консолідації в більшості випадків значно збільшується кількість інтерметалідів в тілі виробу, що є неможливим при застосуванні традиційних технологічних рішень [28, 29].

Спікання під дією електричного струму, порівняно з іншими технологічними рішеннями щодо консолідації порошкових сумішей, при ущільненні порошку під дією електричного струму має наступні переваги [5, 25, 30, 31]:

- рівномірний розподіл тепла по об'єму зразка впродовж процесу електрообробки;
- отримання виробів із контрольованою пористістю;
- відсутність технологічної операції щодо попередньої обробки тиском;
- рівномірне спікання гомогенних і гетерогенних матеріалів;
- мінімальний ріст зерна під дією електричного струму завдяки достатньо короткому часу робочого циклу;
- ефект очищення поверхні частинок від наявних домішок;
- виготовлення одразу потрібної форми чи отримання близького до заданого профілю виробу;
- низькі виробничі витрати завдяки малій собівартості обладнання.

1.2. Фізичні явища, які продукуються дією електричного струму

Виходячи з аналізу перетворень в гетерогенних середовищах [1], до яких можна віднести і порошкову пресовку під час процесу консолідації, можна вважати, що вона знаходиться у стані, який, з одного боку, можна вважати станом дуже в'язкої рідини [32], або, з іншого боку, це є станом із властивостями в'язкопластичного середовища із комірковою побудовою [33].

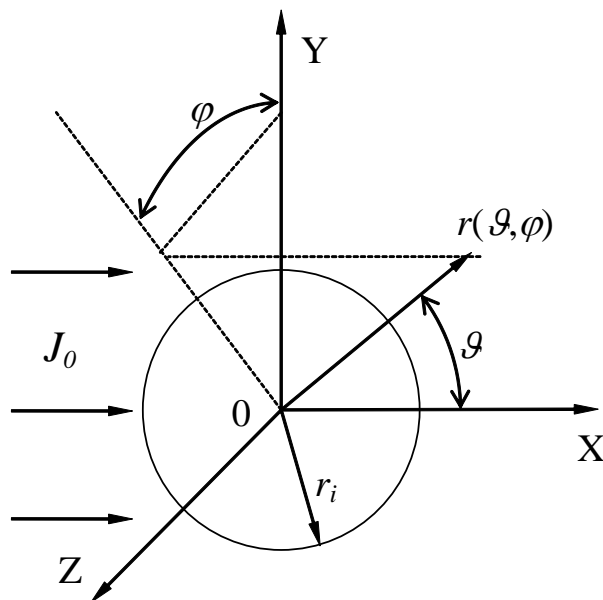
Узагальнену поведінку самого неврівноваженого рідкого середовища, яке оточує тверді частинки, що більш тугоплавкі, в умовах консолідації під дією електричного струму, наприклад, можна визначити, як залежність в'язкості від пористості матеріалу з часом при урахуванні параметрів процесу консолідації під дією електричного струму.

Розглядаючи питання про проходження процесу масообміну між поверхнею твердої порошкової частинки, як провідника і речовиною, що оточує, під дією електричного струму, не можна не сказати, що це питання не нове [34]. Але хоча воно і обговорювалося в літературі, воно, в цілому, розглядається більш спрощено або ж як звичайне теоретичне питання [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]. Експериментальний же блок деякої кількості досліджень торкався тільки опису непрямой дії на взаємодію компонентів суспензії та композиційні системи, наприклад, накладення зовнішнього магнітного поля різного характеру [42, 43, 44, 45] або ж проводився процес непрямого нагрівання (наприклад, у муфельній печі) об'єктів дослідження чи зразків до температури, при якій відбувається спікання у врівноважених умовах [46, 47, 48, 49].

Навколо кожної порошокинки, що оточена струмопровідною розплавленою речовиною під дією електричного струму, виникає ряд похідних процесів і явищ. Поряд із працями, які докладно описують процеси проходження масообміну під дією електричного струму [42, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 38, 58], є також і публікації, які описують процеси масообміну, але без урахування явища, такого як, наприклад, конвекції [46, 47, 48, 49], чи саму конвекцію, але

як відособлене явище [59, 60]. Подібні дослідження, в основному, ґрунтуються на описуванні взаємодії між компонентами, як процесів, що відбуваються тільки під дією температурного чинника і залежать передусім від фізико-хімічних властивостей компонентів сумішей. В них докладно показано, що якби явище конвекції (чи термоконвекції) було процесом керованим, то взаємодія між компонентами в дисперсному тілі могла б стати більш динамічно регульованою та передбачуваною.

Для розуміння постановки питання щодо процесів переміщення маси речовини у прошарку навколо частинки будемо виходити із загальних принципів масоперенесення під дією електричного струму [61, 38, 62, 63]. Застосовуючи його Чоу С. (Chow С. Y.) у своїй роботі обумовив виникнення руху речовини навколо дисперсної частинки сферичної форми за умови нескінченності навколишнього простору відносно точки відліку, скориставшись наступним геометричним поданням (рисунок 1.7) [64].



J_0 – густина електричного струму вдалині; r_i – радіус сфери твердої частинки; r, θ, φ – координати для сферичної системи координат.

Рисунок 1.7. – Модель елементарної комірки для сферичної системи координат за умови нескінченності простору навколо [64]

Через причину того, що загальний підхід у вирішенні питання про рух речовини по прошарку, що оточує тверду сфероподібну частинку має всебічну симетрію, задача вирішується, як двомірна. Візьмемо для розглядання функцію Стокса для дії електричних сил на речовину прошарку у вигляді, наприклад, як подано в [64, 65]:

$$\psi = \frac{U_0 r_i^2}{2} \left\{ \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{r}{r_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{r_i}{r} \right) \right] \sin^2 \vartheta - K \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^2 - \frac{5}{2} + \left(\frac{r_i}{r} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \right] \sin^2 \vartheta \cos \vartheta \right\}, \quad (1.1)$$

де r_i – радіус твердого сферичного тіла, r – радіальна координата, що вказує на місцезнаходження точки у просторі, $K = \frac{\mu_e J_0^2 r_i^3}{8\eta U_0}$ – безрозмірний множник; U_0 – швидкість переміщення струмопровідної речовини вдалині від сфери; μ_e – магнітна проникність ($\mu_e \cong 1$ для рідкого чи розплавленого металу), η – динамічна в'язкість.

З метою зменшення розбіжностей між теоретичним аналізом і практичними дослідженнями з часом виявилось, що необхідно також враховувати і фізичні параметри компонентів системи, що складається із твердого компонента (нерозплавленої речовини) і прошарку певної обумовленої товщини (наприклад, розплавленого металу), що знаходяться під дією зовнішніх і внутрішніх сил, що продукуються електричними, термічними, механічними навантаженнями, тощо.

Ефектом дій є нерівномірність перерозподілу густини електричного струму, що проходить крізь уявну елементарну комірку, виникнення температурних джерел на границях контакту компонентів та, як наслідок, перепади температурного поля, що, у свою чергу, призводить до викривлень поля електропровідності в сферичному прошарку елементарної комірки.

Беручи за основу (1.1) та прийняття умови відсутності прослизання на поверхні твердого тіла можна привести визначення функції Стокса [50, 56, 66, 67]:

$$\psi = -\frac{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^5 \Lambda^3}{16\eta} \left[\left(-\frac{\Lambda^3}{2} + 1 \right) \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 + \Lambda^3 \frac{r_i}{r} - \left(\frac{\Lambda^3}{2} + 2 \right) + \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \sin^2 \vartheta \cos \vartheta, \quad (1.2)$$

$$\Lambda = f(\lambda_i, \lambda_e) = \sqrt[3]{\frac{2(\lambda_e - \lambda_i)}{2\lambda_e + \lambda_i}} \quad (1.3)$$

де λ_i - електрична провідність твердого сферичного тіла, λ_e – електрична провідність прошарку обумовленої товщини струмопровідної речовини, чи прошарку на поверхні оплавленої порошокинки є величина сумарної безрозмірної провідності системи.

З (1.2) можливо написати модифікацію для визначення приведеної функції Стокса [23]:

$$\psi = \Psi \frac{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^5}{16\eta}, \quad (1.4)$$

де $\Psi = f(\Lambda, r_i, r, \vartheta) = -\Lambda^3 \left[\left(-\frac{\Lambda^3}{2} + 1 \right) \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 + \Lambda^3 \frac{r_i}{r} - \left(\frac{\Lambda^3}{2} + 2 \right) + \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \sin^2 \vartheta \cos \vartheta. \quad (1.5)$

Теоретичні дослідження, аналіз та розрахунки, які проведені авторами у [56, 66] приведеної функції Стокса Ψ відповідно показують, що розрахункові ізолінії по (1.4) зрушуються далі від осі $\vartheta=0$ (рисунок 1.8) із зменшенням величини сумарної провідності системи Λ .

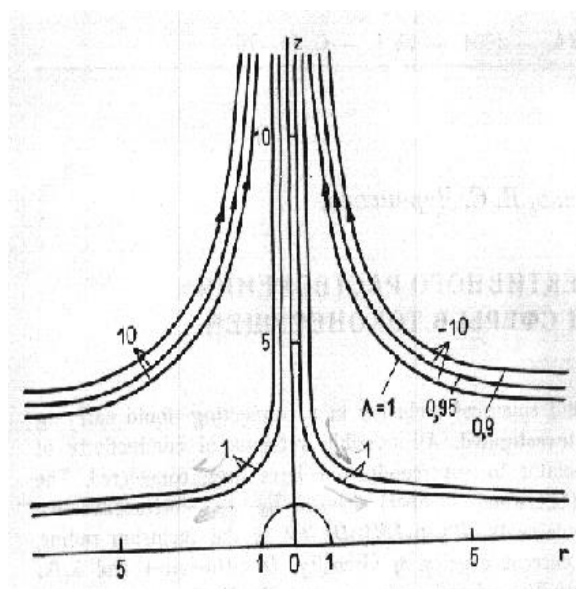


Рисунок 1.8 – Ізолінії приведенної функції Стокса Ψ [56, 66]

При $\Lambda > 0$ напрямок переміщень по прошарку такий же, як і у випадку для не електропровідної частинки ($\Lambda=1$), чому відповідає більш різкий вигин кривої $\Psi = const$. За думкою авторів це означає, що якщо є такий випадок, що чим більше провідність твердого сферичної частинки λ_i відрізняється від провідності прошарку λ_e , що оточує, наприклад для випадків, де має місце $\lambda_i \ll \lambda_e$, то тим більші збудження будуть відчувати поля електричного струму і пов'язаного з ним магнітного поля. Наслідок – крутіші вигини ліній, що показують шлях переміщення струмопровідної речовини навколо твердого, ще не розплавленого, сферичного тіла (рисунок 1.8). Тобто подібним різким переходом електропровідності у дисперсному об'єкті будуть створюватися умови для збільшення величини градієнту магнітного поля на межі переходу поверхня твердого тіла – прошарок речовини, що оточує. При зміні тенденції, що обумовлює наступну умову $\lambda_i \gg \lambda_e$, тобто коли $\Lambda < 0$, напрямок руху речовини змінюється у протилежний бік (рисунок 1.8).

Дане міркування дозволяє у подальших математичних викладеннях більш точно описати дію електричних сил у внутрішньому просторі дисперсного тіла при консолідації на прикладі елементарної моделі комірки.

При наявності переміщення електропровідної речовини по прошарку навколо твердого сфероподібної частинки виникає і поле швидкостей. Сама наявність поля швидкостей буде причиною перенесення речовини у відповідному напрямку, що продифундувала чи перейшла будь-яким іншим чином із поверхні у прошарок .

Чим інтенсивніше буде проходити явище перенесення речовини, що переходить з поверхні твердого тіла у навколишній струмопровідний прошарок, тим більш інтенсивнішою буде взаємодія на межі переходу тверда поверхня – прошарок струмопровідної речовини. [56, 66].

Опираючись на формулу (1.2) можливо визначити складові швидкості переміщення речовини по приповерхневому прошарку – тангенціальну, радіальну компоненти

$$\left. \begin{aligned} v_r &= \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta}, \\ v_\vartheta &= -\frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

де v_r – радіальна і v_ϑ – тангенціальна складові.

Абсолютне значення швидкості можливо розрахувати, користуючись загальноприйнятим співвідношенням відповідно до [64, 65]:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\vartheta^2}. \quad (1.7)$$

Приведена швидкість, як безрозмірна величина:

$$V = \frac{16\eta}{\mu_o \mu_e J_o^2 r_i^5} v, \quad (1.8)$$

де η – динамічна в'язкість розплавленої компоненти.

У випадку коли електропровідність сферичної частинки більше провідності оточуючого середовища ($\lambda_i > \lambda_e$), варіювання загальної провідності системи A відповідно до (1.3) від -2 до нуля призводить кожний раз до зменшення різниці між електропровідностями компонентів системи, тобто між провідністю сферичної частинки і провідністю розплавленої компоненти. В результаті цього виникає кожний раз наступне зменшення швидкості переміщення речовини по приповерхневому прошарку, що оточує тверду частинку [66, 67].

Але якщо є рух чи переміщення речовини, то і буде відбуватися її накопичення в певній мірі в окреслених ділянках простору. Таким чином буде формуватися перерозподіл однієї речовини в іншій, що є основою для формування поля концентрацій по прошарку навколо твердого тіла.

Для початку вважаємо, що рівняння (1.2) задовольняє початковим умовам задачі, що подані у [50, 56, 66, 67]. Тоді набір співвідношень, що містить саме стаціонарне диференціальне рівняння і граничні умови щодо визначення концентрації у обраному місці простору де $c=c(r, \vartheta)$, відповідно до [53] має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_\vartheta \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial \vartheta} &= D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \\ c(r_i, \vartheta) &= c_s, \quad c(\infty, \vartheta) = c_0, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \vartheta} \right|_{\vartheta=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

де c_0 – концентрація речовини на деякому віддаленні від твердої поверхні тіла, c_s – концентрація речовини на поверхні твердого тіла.

Вирішення задачі (1.9) веде до результату, котрий дозволяє визначити поле концентрацій для зовнішнього прошарку товщиною $1,1r_i$ над поверхнею сферичної частинки [66, 67]:

$$\frac{c_s - c}{c_s - c_o} = \frac{1}{\frac{1}{3} \Gamma(1/3)} \int_0^{z_o} \exp\left(-\frac{4}{9} x^3\right) dx, \quad (1.10)$$

де z_o – визначається із умов постановки задачі (1.9) [66], Γ – звичайна гама функція.

Подальше вирішення задачі (1.10) з метою опису процесу перенесення речовини за механізмом конвективної дифузії дозволяє визначити написання локального безрозмірного коефіцієнта масовіддачі з поверхні твердого тіла в розплавлену компоненту [54]:

$$Nu_g = -\left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=1} \quad (1.11)$$

Nu_g – дифузійне число Нуссельта, яке визначає ступінь масовіддачі з поверхні твердого тіла.

Для прийнятих граничних умов відповідно до (1.9) та враховуючи формулу для повного дифузійного потоку з поверхні сферичного тіла для випадку із наявністю стаціонарної атомної дифузії [68], можливо визначити і відносний повний потік речовини з поверхні твердого тіла, тобто, дифузійний критерій Нуссельта або, якщо точніше, це вже є критерій Шервуда [63], що визначається із урахуванням загальної електропровідності системи (1.2) [56, 66]:

$$\begin{aligned} Sh &= \frac{0.919 \cdot 5^{1/3}}{2^{2/3} \Gamma(1/3)} \left[\frac{r_i^4 \mu_o \mu_e J_o^2}{\eta D} \left(\left(\frac{2|\lambda_e - \lambda_i|}{2\lambda_e + \lambda_i} \right) \cdot \left(\frac{7\lambda_e + 5\lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i} \right) \right) \right]^{1/3} = \\ &= \frac{0.919 \cdot 5^{1/3}}{2^{2/3} \Gamma(1/3)} \left[\frac{r_i^4 \mu_o \mu_e J_o^2}{\eta D} \frac{|\Lambda^3| (8 - \Lambda^3)}{2} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (1.12)$$

На відміну від критеріїв, отриманих в [52, 55] для процесів масообміну, що обумовлюються тільки дією електричного струму та електромагнітних сил в

формулі (1.14) є присутнім додатково введений множник $\left(\frac{7\lambda_e + 5\lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i}\right)$, який дає більш уточнену величину критерію масовіддачі з поверхні твердої частинки.

До таблиці 1.2 зведені деякі величини електропровідностей компонентів, що використовувалися в дослідженнях, описаних в [54, 55].

Таблиця 1.2. Електропровідності компонентів та їх співвідношення

Матеріал	$\lambda_i \times 10^{-3}$, (Ом×м) ⁻¹ [69, 70, 71]	$(\lambda_i/\lambda_e), \times 10^{-3}$,	$\left(\frac{2 \lambda_e - \lambda_i }{2\lambda_e + \lambda_i}\right)$	$\left(\frac{ A^3 (8 - A^3)}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$
Сталь 3	2,00	3,23	2,00	10,0
Латунь	1,41	2,22	2,00	10,0
Свинець	0,49	2,04	2,00	10,0
Розчин	10 % розчин НСІ, $\lambda_e=63,02$ (Ом×м) ⁻¹ [72]			

Прикладом системи, що складається із твердої і більш тугоплавкої частинки та струмопровідної речовини, що оточує, (наприклад, розплавлений метал) може слугувати порошок карбїду вольфраму (WC) у розплавленому кобальті [50, 66]. За умов, наведених у таблиці 1.3, оцінка коефіцієнту масовіддачі із поверхні по формулі (1.14) (при наявності процесу, що лімітує дифузію атомів W) дає $Sh \sim 2$.

З практичної сторони по даному питанню існує дослідницька робота [52]. В ній проведено дослідження можливості істотної інтенсифікації процесу масовіддачі поверхні локальних твердих, рідких або газових тіл, що знаходяться під дією електромагнітного поля в струмопровідній речовині.

Методика експериментів дозволяла визначати зменшення маси сфер із металу при умові розчинення їх у струмопровідному прошарку під дією електромагнітного поля, яке утворювалося завдяки проходженню крізь 10% розчин соляної кислоти (НСІ) постійного електричного струму.

Таблиця 1.3. Властивості складників та умови досліджень [66]

радіус частинки (частинка карбїду вольфраму, WC), r_i , м		$0,5 \times 10^{-6}$
електропровідність, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	тв. частинки, λ_i	$\approx 1,1 \cdot 10^6$
	навколишнього середовища, λ_e	$\approx 0,9 \cdot 10^6$
динамічна в'язкість розплавленого кобальту при температурі плавлення, η , кг/м·с		$3 \cdot 10^3$
густина електричного струму, J_0 , А/м ²		$\sim 1,5 \cdot 10^{10}$
величина коефіцієнту масовіддачі речовини із поверхні, Sh		~ 2
температура, t , °С		~ 1500

Отримані результати показали, що густина дифузійного потоку з поверхні сферичної частинки збільшується зі збільшенням діаметра сфери і густини електричного струму [52].

Порівнюючи розрахункові роботи [54, 55, 58] з експериментальною роботою [52], варто враховувати також і можливість зменшення маси частинки внаслідок звичайної хімічної реакції з кислотою [72] та видалення дифузанта ще й за механізмом атомної дифузії. Член, що враховує атомну дифузію в рівнянні (1.14), а також у роботах [54, 55, 58] відсутній, що швидше за все і дає узгодженість 12-13% між практикою та теорією.

На думку авторів [58] розходження впливало з того, що потік маси з твердої поверхні сильніше залежить від густини струму, ніж це є по рівнянню (1.12). Це, в основному, відбувається через деяке нагрівання електроліту в процесі експерименту. За деяким припущенням таке може означати, що поряд із електроконвекцією буде йти і термоконвекція [36, 42], тим сильніше, чим більша різниця температур між поверхнею частинки і деякою умовною віддаленою точкою від поверхні [73].

Беручи до уваги теоретичні і практичні дослідження щодо масообміну і масоперенесення, не можна не рахуватися із тим, що у більшості випадків, порошкова засипка має не ідеальну величину електричної провідності.

Самі умови вирішення задачі, коли електропровідність сторонньої сферичної частинки є ідеальною, або ж вона є ідеально непровідною, дають найвагомійший внесок у похибку результату при його порівнянні з практикою [52, 53, 54, 55, 58, 65]. В таких порівняннях авторам припадало робити деякого роду припущення, щоб наблизити теоретичні судження до практичних результатів.

1.3. Приклади продукції інструментального призначення, які отримують при застосуванні дії електричного струму

Прикладами продукції, які одержують за допомогою методів, що використовують дію електричних сил, можуть служити об'єкти з композицій та сумішей на основі карбідів (TiC , WC , B_4C , SiC) [57, 74, 75, 76, 77], боридів (TiB_2) [78, 79], нітридів (BN , AlN , TiN) [15, 16, 80], де поверхня частинок природно покрита міцним оксидним шаром [16, 81, 82] чи просто оксидів (Al_2O_3) [83, 84], алмаз або інструментальні матеріали промислового призначення, що вміщують абразив [85, 86, 87].

Застосовуючи відповідні технологічні прийоми, отримують продукцію складної геометричної форми [88]. Приклади геометричних форм профілів продукції зображено на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Приклади зразків та виробів

1.4. Висновки до розділу 1 та формулювання завдань

Аналіз літературних даних показав – використання технології для отримання виробів інструментального призначення на абразив-металевій основі, під дією електричного струму є актуальним питанням розвитку сучасної промисловості.

Застосування методів, де рушійним важелем є електричний струм, надає прямі можливості до різкого підвищення фізико-механічних характеристик об'єктів без істотної зміни хімічного складу отриманих матеріалів, чи проведення одночасно специфічних хімічних реакцій, ініційованих проходженням електричного струму.

Виникнення розплавлених ділянок в областях міжчастинкових контактів під дією електричного струму, що утворюють перешийки і можуть огортати твердий, більш тугоплавкий складник, із одночасним механічним навантаженням на пресовку ініціює взаємний рух у формі прослизання порошкових частинок одної відносно іншої, що сприяє процесу ущільнення.

Аналіз наявних теоретичних і експериментальних даних призводить до висновку, що теоретичні дослідження проводилися на основі моделей в'язко-текучого тіла на базі узагальненого підходу під дією температури, або ж обумовлювали моделювання процесів взаємодій під дією електричного струму тільки в зоні міжчастинкового контакту. Але разом з температурним аспектом в процесі консолідації діє і електричний струм, який є ініціатором формування структури виробу, механізм дії якого, як один з варіантів, буде представлено в цій роботі.

Отже, метою роботи є 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

високозносоствійких 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 високозносоствійких матеріалів на основі металевій 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 комірки, 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 металевій зв'язки від температури.

2. Формулювання новітніх підходів до процесу консолідації абразиввміщуючих порошкових матеріалів із металевій зв'язкою під дією постійного електричного струму. Аналіз процесів масообміну між компонентами порошкової суміші та масопереміщення речовини по об'єму елементарної комірки 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 металевій 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.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У розділі описано порошкові матеріали, устаткування для отримання зразків під дією електричного струму, прес-інструмент та обладнання для випробування їх на працездатність і методики дослідження із відповідними технологічними умовами.

2.1. Об'єкти дослідження

Дослідження проводилося, як визначення процесів переміщення речовини під дією електричного струму на межі переходу поверхня твердого тіла (порошкова частинка) – рідка фаза (розплав).

Для математичних розрахунків, а також їх співставлення з практикою було обрано певний ряд двокомпонентних дисперсних сумішей, що за певних температурних умовних інтервалах можуть утворювати систему типу тверда частинка – струмопровідна речовина, що оточує. На практиці подібного роду квазісуспензії можуть бути також утворені і при використанні однокомпонентного порошку під час оплавлення його поверхні з утворенням приповерхневого, деякої товщини, струмопровідного прошарку.

Експериментальні і теоретичні дослідження проводилися при температурах нагрівання двокомпонентної системи трохи вище точки плавлення більш легкоплавкого компоненту. Подібний подвійний фізичний стан системи створювався з метою здійснення опису та прогнозування ходу процесів формування будови, структури та очікуваних фізико-механічних властивостей майбутніх сплавів та композиційних матеріалів. Як правило, процес спікання дисперсних тіл супроводжується наявністю визначеної доли розплавленої компоненти чи матриці (зв'язки), що плавиться, та порошкових частинок різної природи і геометрії, які після закінчення процесу консолідації стануть складовими матеріалу.

До таблиці 2.1 зведено приклади компонентів, що можуть входити до складу металевих зв'язок абразиввміщуючого інструменту [69, 70, 71, 89, 90].

Таблиця 2.1 – Приклади двокомпонентних систем, що були використані в математичних розрахунках

Матеріал	Тип складової	Температура, °С		Що вивчалось
		Плавлення компоненту	розплавленого середовища	
Мідь (Cu) [91]	Тв. частинка		---	Ефект розчинення і взаємодії
Олово (Sn) [92]	Розплавлене середовище	231,9	300-327	
Нікель (Ni) [93]	Тв. частинка		---	Ефекти розчинення і взаємодії
Корунду (Al ₂ O ₃) [94]	Тв. частинка		---	Ефект переміщення
Нікелевий сплав ((%, мас.): 4,1 Мо, 5,3 W, 10,9 Cr, решта — Ni)	Тв. частинка		---	Ефект переміщення
Алюміній (Al), та сплав В95 [95, 96]	Розплавлене середовище		700-800	---
Графіт (МПГ-6) [97, 98, 99]	Зовнішня тверда оболонка	---	---	Матеріал прес-інструмента.

Сторонніми тілами також можна назвати і легуючі елементи, що частіше всього вводяться у розплавлений метал, матрицю чи заздалегідь у вигляді порошку, твердих дрібних частинок різноманітної геометрії, схожою із сферою чи циліндром (волокна, стержні). Взагалі такі сторонні предмети можуть бути гарно електро– або не електропровідними.

Компоненти парних систем обрані з ряду практичних міркувань:

- достатнє змочування один одним за умов проведення експериментів;
- суттєве розходження в електропровідностях компонентів пропонованої моделі;
- практично низька температура плавлення оточуючої компоненти, що обумовлює достатньо невисокі температури проведення експериментів;
- поширеність і достатньо мала вартість.

Відповідно до практичного застосування компонентів теоретичного розглядання були узяті у наукових дослідженнях матеріали інструментального призначення на металевій основі, що вміщують абразивні компоненти [89, 90]. Перелік їх наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Склади металевих зв'язок, що були взяті у розглядання

№ п/п	Об'єкт дослідження (композиція)	Застосування
1	40,0 % Cu + 11,0 % Sn + 44,0 % Co + 5,0 % Cr	Обробка нерудних матеріалів, твердих сплавів з підвищеним зніманням, хонінгування
2	M1(Cu-Sn)+10% Ti	Обробка нерудних матеріалів, твердих сплавів з підвищеним зніманням, хонінгування
3	Cu-Al (M04, M5-5 и др.)	Шліфування твердих сплавів, а також твердих сплавів разом зі сталлю. Електроалмазне шліфування і заточування.
4	Ni-Al (Бороалюміній ВКА-1, вуглеалюміній)	В основному по обробці металевих композиційних матеріалів на деревинній основі полімерних
5	(12,5% об.) АС 200, 400/315 мкм, алмаз	Шліфування і заточування твердих сплавів. Хонінгування, суперфінішування, притирання, полірування. Правлення абразивних кругів

2.2. Обладнання та умови проведення експериментів

Обладнання, що було в наявності, обумовлювало можливість у здійсненні різного рівня електро-механо-термічного навантаження на порошкову пресовку під час процесу консолідації (таблиця 2.3) (рисунок 2.1). Але для проведення

наукових досліджень було обрано і використано лише стаціонарне дослідницьке устаткування "ЕРАН 2/1" [24, 100].

Задача дослідження обумовлює вивчення дії тільки постійної складової електричного сигналу на ініціалізацію процесів тепло- і масоперенесення між компонентами. Тобто можна цілком впевнено сказати, що наявне обладнання дозволяє створювати необхідні умови для проведення експериментальних досліджень під час проходження постійного електричного струму крізь пресовку та створення необхідного рівня густини струму із досягненням і підтримкою достатнього рівня температури в об'ємі зразка.

Таблиця 2.3 – Параметри обладнання

№ п/п	Назва обладнання устаткування	Тип електричного струму	Потужність, кВт (максимальна сила струму, кА)	Сила максимального пресування, кН
1	"СТРУМ – 901А"	Змінний промислової частоти, 50 Гц	40 (4)	100
2	"СТРУМ 902"	Змінний промислової частоти, 50 Гц	100 (8)	200
3	"ЕРАН 2/1".	Спрямлений струм (постійний)	10 (2,7)	400

Досягнення і підтримка необхідного рівня температури проводилася шляхом плавного регулювання сили постійного електричного струму в замкнутому колі.



Рисунок 2.1 – Дослідницьке устаткування

2. 3. Конструкція прес-інструмента для експериментальних досліджень

Прес-інструмент, який повинен бути використаним щодо вивчення дії електричного струму, як ініціатора процесів тепло- і масоперенесення під час процесу консолідації дисперсних композицій, повинен витримувати визначеного рівня комплексні механо-електричні навантаження. Приклад типового прес-інструменту загального призначення для отримання сегментів інструментального призначення алмаз-абразивного вмісту показано на рисунку 2.2. Він складається з розбірної матриці, затиснутої в обойму, найчастіше металеву, верхніх і нижніх електродів-пуансонів, робочих вставок, що додатково з боків стискають порошкову суміш [23, 82].



Рисунок 2.2 – Приклад прес-інструменту та виробу алмаз-абразивних сегментів

За потребою, для отримання виробів різних розмірів з різних порошкових матеріалів вигляд типового прес-інструмента може змінюватись. Наприклад, при спіканні таблеткових елементів під незначним загальним тиском (100 – 400 кг) графітову матрицю можна не обкладати тепло- і електро-ізолюючими матеріалами та затискати в металеву обойму, що робиться з метою збільшення механічних властивостей матричної обойми [23, 101].

Взагалі проблему вибору матеріалу для прес-інструмента на практиці вирішують, розділяючи на дві частини:

- матеріали для матриць [82],
- матеріали для електродів-пуансонів [102].

Для проведення експериментів використовували електропровідний прес-інструмент, що виготовлявся з високоміцного графіту МПГ-6 [82, 97, 98, 99, 102] і мав достатньо просте конструктивне виконання. Графіт, як конструкційний матеріал, був обраний через свою доступність, легкість

механічної обробки і не взаємодії з компонентами металічних систем при температурах проведення досліджень [16, 82, 101, 102, 103].

На рисунку 2.3, схематично, показано прес-інструмент, що виготовлявся із високоміцного графіту МПГ-6 і використовувався.

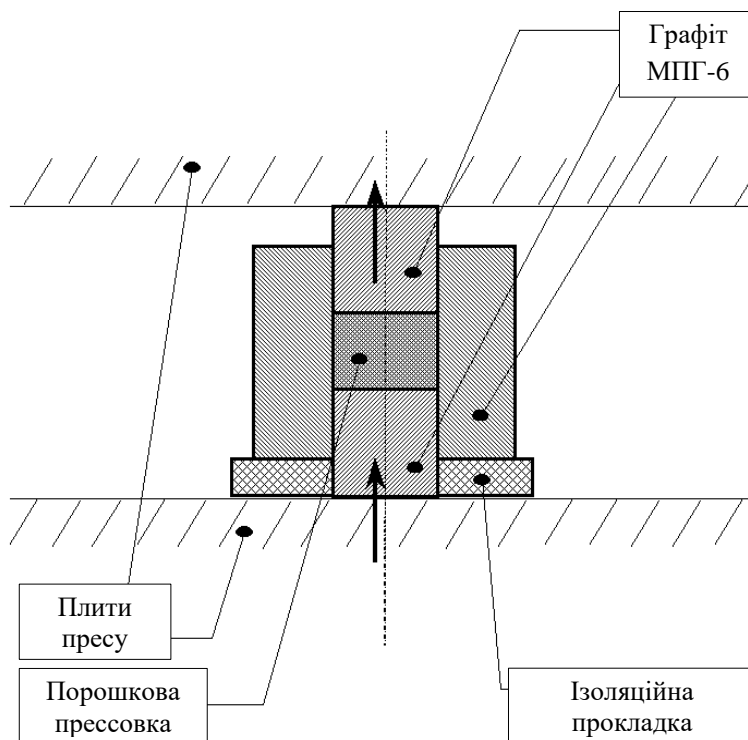


Рисунок 2.3 – Загальна схема прес-інструменту для проведення експериментальних досліджень

Експериментальний зразок прес-інструменту має форму, що дозволяє проводити засипку, встановлювати його і знімати, випресовувати зразки.

2.4. Методика обробки зразків та одержання результатів

Для дослідження металографічних особливостей структури і розподілу речовини у зразках після проведення експериментів в даній роботі використовувалися металографічні і рентгеноструктурні методи досліджень згідно з [104, 105, 106].

Виготовлення зразків проходило відповідно до визначеної технологічної схеми, яка зображена на рисунку 2.4.

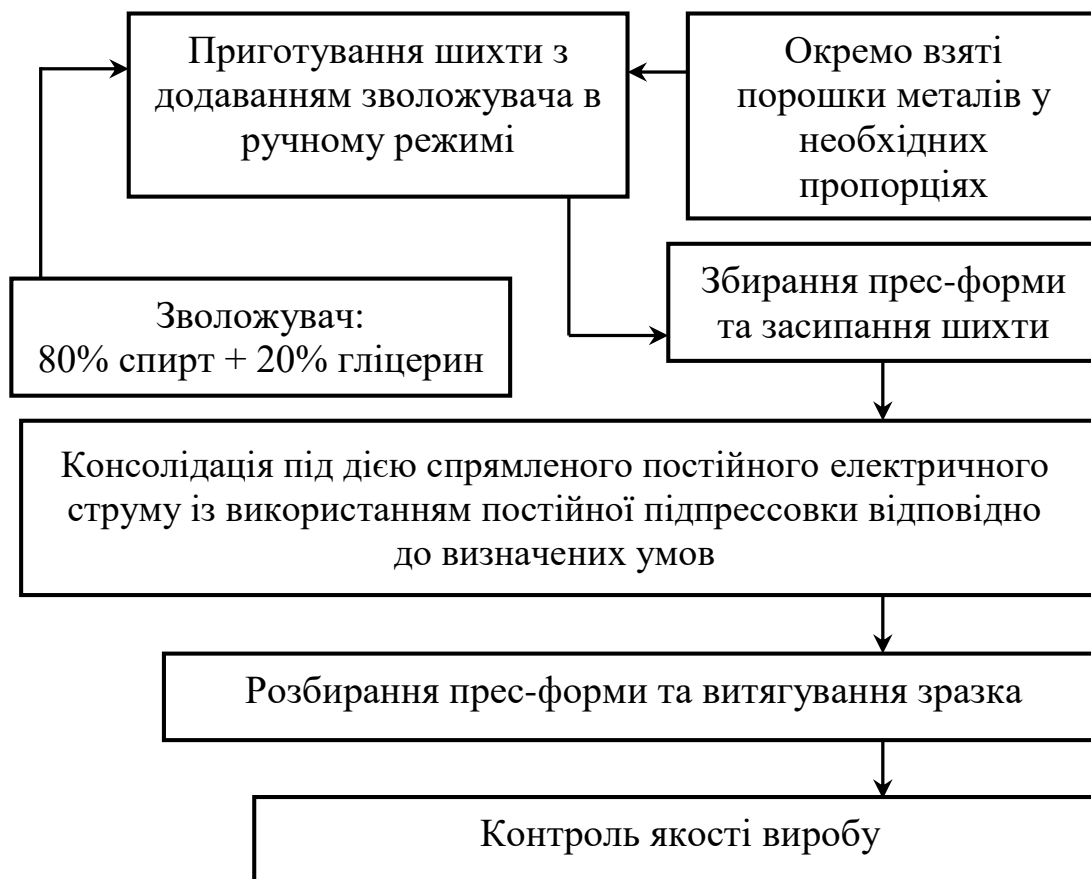


Рисунок 2.6 – Схема приготування зразків

Зразки для мікроструктурного аналізу підготовували відповідно до методик, описаних в [104, 105].

Кількісний аналіз мікроструктур спочатку було проведено за допомогою морфометричного обладнання на базі металографічного мікроскопу Neophot 21 та розрахункового електронного комплексу з метою отримання інформації щодо процентного складу отриманого матеріалу, а з часом задіювали і програмний комплекс АМІС [107].

Визначення щільності отриманих зразків (за необхідністю) проводилося гідростатичним методом при використанні стандартної методики згідно з [108, 109].

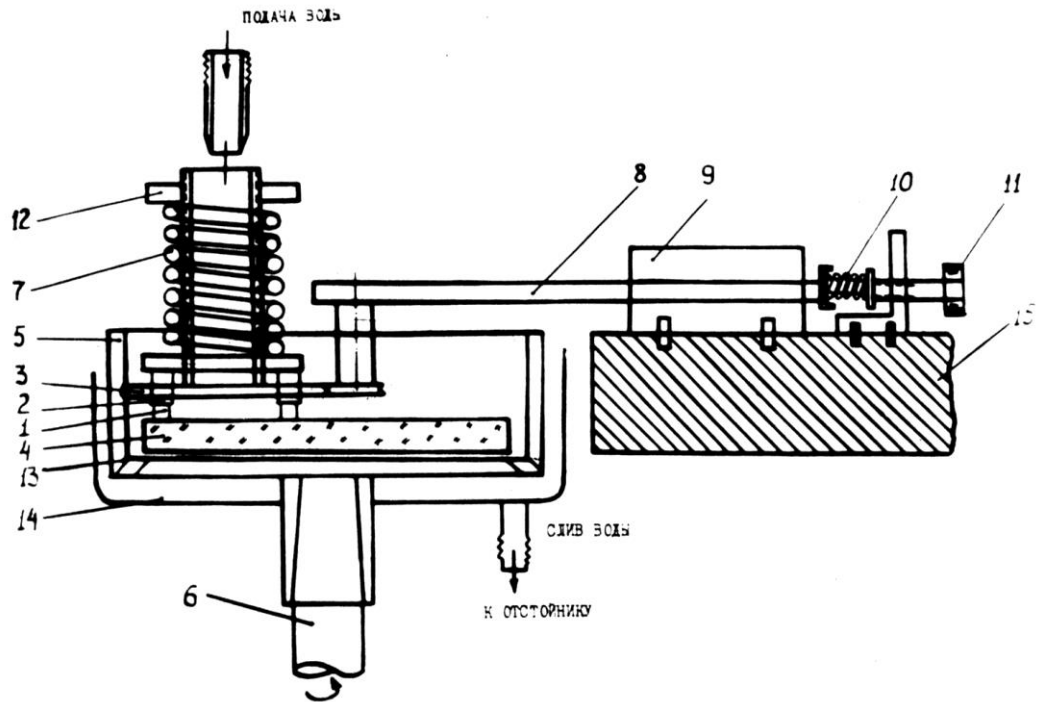
Визначення твердості отриманих зразків проводилося відповідно до методик, що описані [110, 111] із використанням наявного обладнання - твердомір моделі ТК-2М.

Однією із найважливіших характеристик інструменту є його *абразивна здатність*, це кількість (маса) зішліфованого під час механічної обробки матеріалу (г) одиницею загальної площі інструменту (см²) за умовну одиницю часу (хв). Абразивна здатність вимірюється при обробці твердих нерудних матеріалів (граніт, мрамур) на доопрацьованому відповідним чином лабораторному стенді. Схема стенду дозволяє моделювати процес різання під час плаского зашліфовування відповідно ГОСТ 25594-83.

Стенд сконструйовано у вигляді приставки до верстата для виготовлення металографічних шліфів ПШСМ-2. Ескізний вигляд подано на рисунку 2.5.

Елементи, що шліфують /1/ в кількості 4 шт. (таблетки діаметром 10 мм і заввишки 5 мм) встановлюються в спеціальних затискачах /2/ (рисунок 1.12), які прикріплюються до веденого диска /3/, розташованого над поверхнею контртіла /4/ (рисунок 2.6). Диск /3/ знаходиться у фрикційному контакті з провідним диском /5/, що сидить на валу верстата /6/. Крізь отвори у веденому диску алмазвміщуючі елементи опиралися на поверхню скляного контртіла і притискалися до нього за допомогою тарованої пружини /7/. З протилежного боку провідний диск підтримувався ролик-вилкою /8/, укріпленою в направляючій /9/. Пружина /10/ служить для демпфування горизонтальних коливань в системі, зусилля притиску цієї пружини регулюється гвинтом /11/.

При включенні верстата алмазвміщуючі елементи ковзали по поверхні скляного контртіла. Зусилля притискування елементів до оброблюваної поверхні складалося із загальної ваги конструкції, підвішеної платформи і зусилля пружини, яке регулювалося мікрогвинтом /12/.



1- випробовуваний інструментальний елемент, 2- зажим, 3- ведений диск
4- контртіло, 5- провідний диск, 6-вал верстата, 7-притискна пружина, 8-ролик-вилка, 9- направляюча, 10- пружина, 11- притискний гвинт, 12- микрогвинт, 13- гумова прокладка, 14- піддон, 15- стіл верстата.

Рисунок 2.5 - Схема стану для лабораторних випробувань зразків інструментальних елементів [26]



а



б

а – державка з затискачами; б – затискач із зразком

Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд спеціальних затискачів

В зразках, що проходили випробування на механічні властивості, використовувався алмазний порошок достатньо великої зернистості – 315×400 мкм. Насамперед інструментальні елементи з таким зернистим порошком використовуються в основному для каменеобробки (нерудні матеріали та речовини). Тому якість отриманих зразків визначалася при обробці граніту, мармуру (рисунок 2.7).



а



б

а – граніт ; б – мрамур

Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд констртіл до випробувань

РОЗДІЛ 3 ПЕРЕМІЩЕННЯ В ДИСПЕРСНИХ ТІЛАХ ПІД ЧАС КОНСОЛІДАЦІЇ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

У розділі проведений теоретичний аналіз, який показує, що у разі відмінності електропровідності поверхні твердої порошоківки, як компоненти дисперсного тіла, від електропровідності розплавленої компоненти, що оточує (а це має місце практично завжди), по об'єму прошарку ініціюється направлене переміщення речовини за рахунок дії на частинку сил електричного походження.

Для проведення моделювання визначено елементарну комірчку в порошковому тілі, крізь яку проходить постійний електричний струм і умови вирішення задачі.

Аналіз результатів математичних розрахунків 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.

3.1. Динамічні ефекти навколо твердої поверхні порошкової частинки

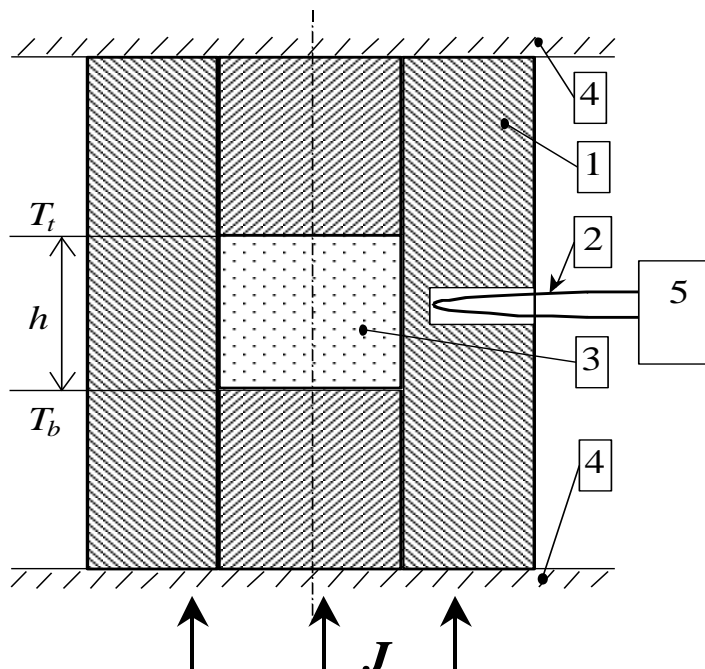
Всі композиційні матеріали у собі містять в твердому стані відмінні за природою компоненти, як фактично є чужорідними тілами. Вони можуть цілеспрямовано вводитися в будь-який матричний матеріал (зв'язуючу компоненту шихти), що плавиться під час консолідації дисперсного тіла. Як правило, для подібних складників характерна відмінна від оточуючого середовища електропровідність та інші фізичні властивості, наприклад, вищу температуру плавлення.

Задача про ініціювання руху електропровідної розплавленої речовини навколо поверхні сферичних частинок під дією електричного струму, в принципі, вирішена в [64] (для непровідних частинок) і в [66, 112, 113, 114] (для добре провідних частинок).

Під час проведення дослідно–технологічних робіт по одержанню зразків на основі матричного матеріалу, наприклад, антифрикційного та інструментального призначення з металевою матрицею (каркасом) та наповнювачами у вигляді елементів, що армують, чи абразивної складової [24, 25, 30, 115] було виявлено явище направленої руху твердих (не розплавлених) частинок, що оточені розплавленим матеріалом основи зв'язуючої матриці під дією електричного струму [1, 10, 27, 28, 37, 79, 102, 103, 116, 117, 118, 119, 120, 121]. Відкриття подібної динамічної поведінки призвело до цілеспрямованого проведення комплексу теоретичних та технологічних досліджень під час одержання чи подальшої експлуатації матеріалів інструментального призначення з металевою матрицею та наповнювачами абразивного або антифрикційного призначення і дозволяє виявити, прогнозувати та уникати в майбутньому небажаних формувань структури під дією електричного струму [1, 120, 121].

Так в процесі консолідації, яка проходить під дією електричного струму і є дуже короткочасною (3-7 хв.), в об'ємі зразка більш легкоплавка компонента пресовки може оплаватися до певної міри або може встигнути повністю розплавитися (якщо її вміст не перевищує 2 %). З появою деякої кількості розплавленої компоненти під дією електричного струму (наприклад, постійного), який проходить крізь засипку в циліндричному контейнері (рисунок 3.1), більш тугоплавкі частинки починають виявляти динаміку [122, 123]. Така поведінка твердих порошкових частинок здійснюється під дією сили, яка є, зокрема, наслідком взаємодії електричного струму, що проходить, і породжуваного ним магнітного поля [122]. При такій ситуації сам комплексний провідник, який по суті є порошковою сумішшю + розплавлена компонента, випробовує спрямоване до внутрішнього центру тіла електричної природи

механічне навантаження, що є по своїй фізичній суті усебічним обтисканням провідника електрики або комплексного тіла у вигляді суспензії [10, 19, 116, 121, 123, 124].



1 – прес-інструмент із графіту МПГ-6; 2 – термопарний датчик; 3 – порошкова засипка (зразок); 4 – струмопідвідні плити пресу; 5 – самописний прилад типу КСП-4, T_t – температура верхньої поверхні зразка; T_b – температура нижньої поверхні зразка.

Рисунок 3.1 – Схематичне зображення прес-інструмента із зразком

Експериментально і теоретично встановлено, що таке обтискання генерує механічної природи навантаження на провідник, яке усебічно спрямоване до центральної осі (рисунок 3.1). В результаті силова дія, що виникає, призводить до трансформації поверхні провідника і генерує цим виникнення поля тиску в самому провіднику [122, 123, 125, 126, 127, 128, 129]. Це, у першу чергу, і призводить до ефекту перерозподілу твердих порошкових частинок, що оточені розплавленою компонентою [122, 125, 126, 127, 129].

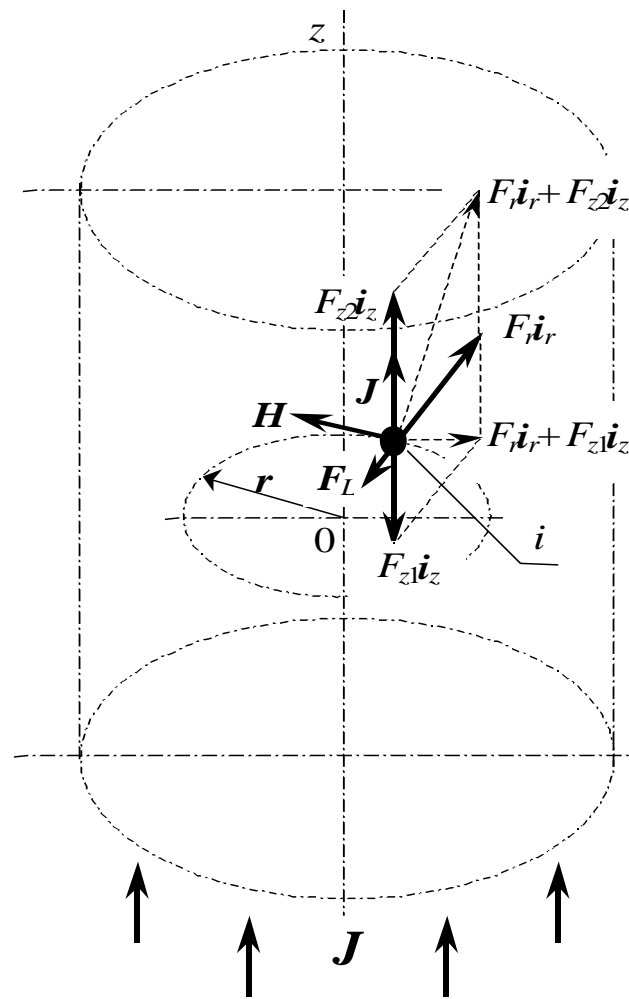
Пояснення механізмів подібного комплексного перерозподілу механічного навантаження в дисперсних тілах під дією електричного струму дозволить відповісти на низку запитань при формуванні каркасних і безкаркасних матеріалів. Знання названого явища може бути також використане для розробки основ технології створення матеріалів з градієнтом властивостей і розвитку схожих областей у матеріалознавстві [122].

З метою пояснення динамічних явищ, що виникають під дією електричного струму, необхідно прийняти до розглядання саму просту модель у вигляді вертикального циліндра. Зазвичай порошкова пресовка під час консолідації вже містить у собі врівноважені в початковому стані тверді різної електропровідності частинки в розплавленій компоненті. Таке структурне утворення можна вважати подібним до квазісуспензії.

По-перше, запропонована модель – це вертикально розташований циліндр із деяким радіусом r_0 (рисунок 3.2), де електричний струм протікає вздовж центральної осі, тобто в аксіальному напрямку [122, 123, 124, 130].

Розглянемо силову дію на окремо узятую тверду (сферичної форми) порошкову частинку, яка знаходиться на відстані r від осі під дією постійного електричного струму [124]. Бічні ефекти, що виникають при цьому, до уваги не беремо з метою спрощення вирішення задачі, оскільки перерозподіл твердих не зафіксованих частинок відбувається як результат зміщень, що мають осьову і радіальну компоненти (рисунок 3.2) [123].

Обтиснення порошкової пресовки від проходження електричного струму обумовлює виникнення тиску всередині провідника [130]. Також приймемо до уваги, що сферичного типу порошкова частинка буде всебічно оточена прошарком рідини.



i – частинка, що має провідність, відмінну від речовини, що розплавилася; J – густина електричного струму; H – напруженість магнітного поля, що породжується від проходження електричного струму; F_L – об'ємна сила Лоренца; $F_i r$ – квазіархімедова сила (сила електромагнітного виштовхування, що діє на чужорідну частинку); $F_{z1} i_z$ – сила, що "топить" частинку ($\rho_i > \rho_e$); $F_{z2} i_z$ – сила, що викликає "спливання" частинки ($\rho_i < \rho_e$).

Рисунок 3.2 – Модель, що описує розподіл сил, які діють на врівноважену тверду частинку

Величина тиску (сили обтиснення) в центрі (на осі z (рисунок 3.2)) є набагато більшою, ніж на зовнішній поверхні провідника і залежить від сили електричного струму [123]:

$$p(r) = -\frac{\mu_0 \mu_e (r_0^2 - r^2) I^2}{4\pi^2 r_0^4} = -\frac{\mu_0 \mu_e \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) I^2}{4\pi^2 r_0^2}, \quad (3.1)$$

де μ_0 – магнітна стала ($4\pi \times 10^{-7}$ Н/м), μ_e – магнітна проникність ($\cong 1$), I – сила електричного струму, r – радіальна координата.

Перерозподіл величини обтиснення по об'єму провідника при використанні (3.1) для різних величин електричного струму 500 А, 600 А, 700 А показано на рисунку 3.3. Залежність величини обтиснення всередині зразка від величини електричного струму згідно із (3.1) для величин дискретних r/r_0 при радіусі отриманого зразка в 7 мм показано на рисунку 3.4 [123].

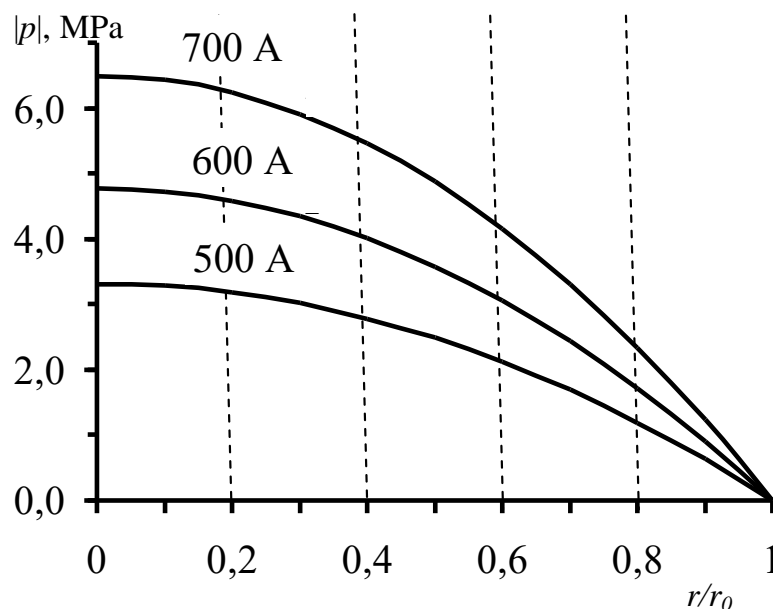


Рисунок 3.3 – Величина обтиснення для деяких значень струму

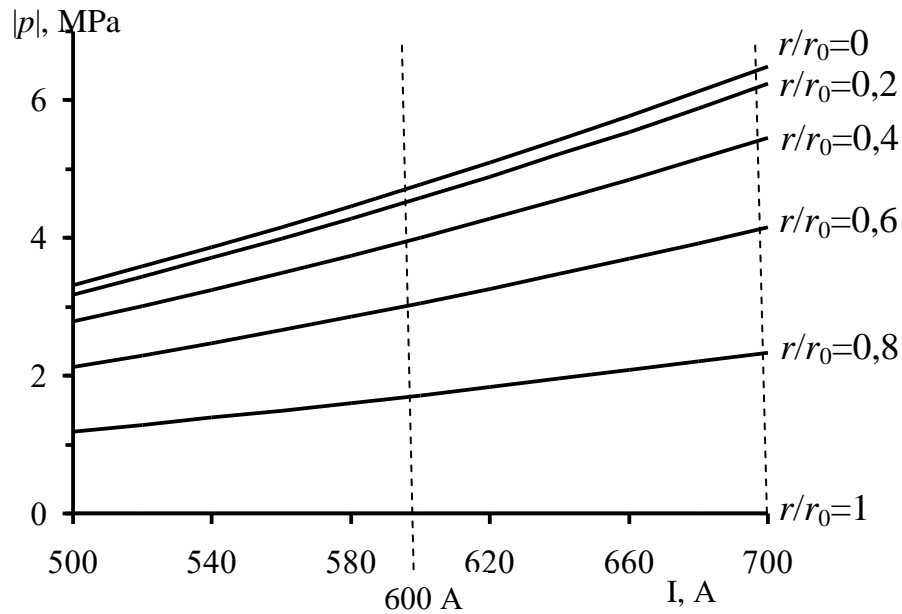


Рисунок 3.4 – Залежність обтиснення від різних r/r_0

Розвиток думки вказує, що в гетерогенному тілі є формування умов щодо переміщення твердих компонент до центру, чи навпаки, до зовнішньої бічної поверхні майбутнього виробу [123].

Для представленої геометрії і спрощення умов вирішення задачі знехтуємо урахуванням силових дій від гравітаційних ефектів або якої-небудь дії на тверді врівноважені (завислі) порошкові частинки (рисунок 3.2) [123]. Радіальна компонента сили, яка створюватиме усебічну дію обтискання електропровідної суспендованого типу системи, є електромагнітна сила, що виштовхує, яка може бути записана у вигляді [128, 131]:

$$F_r \mathbf{i}_r = F_{em} = F_L K \cdot \frac{4}{3} \pi r_i^3, \quad (3.2)$$

де F_L - густина сили, що виникає внаслідок взаємодії електричного струму і магнітного поля, що є об'ємною силою Лоренца; $K = -\frac{3}{2} \frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i}$ – коефіцієнт електромагнітного виштовхування; r_i – радіус сферичної частинки.

Виштовхувальну силу F_{em} (3.2) іноді називають *квазіархімедовою силою електромагнітного походження* [124, 131]. Із урахуванням коефіцієнту електромагнітного виштовхування можна визначити величину дії електромагнітної виштовхувальної сили, що діє на частинку [124]:

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{F}_{em} = \frac{\mu_0 I^2 r_i^3}{\pi r_0^4} \left[\frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i} \right] r \mathbf{i}_r, \quad (3.8)$$

Проведення розрахунків по (3.8) дозволило показати перерозподіл сили електромагнітного виштовхування F_{em} при різних величинах електричного струму для випадку, коли розплавлений провідник оточує тверді порошкові частинки (рисунок 3.5, рисунок 3.6).

За наявності в консолідованому тілі, крізь який проводиться електричний струм, в твердому стані суспендованих частинок з провідністю меншою, ніж оточуюче розплавлене середовище ($\lambda_i < \lambda_e$) з формули (3.8) видно, що електромагнітна сила буде виштовхувати їх до зовнішньої бічної поверхні зразка чи виробу. У разі наявності в засипці більш електропровідних частинок (коли $\lambda_i > \lambda_e$) електромагнітна сила (3.8) буде тягти їх до центру зразка. Тобто відбуватиметься переміщення окремо взятої в розглядання частинки до центральної осі за рахунок взаємного переміщення розплавленої компоненти до периферії.

З цього витікає висновок про те, що частинки, які гірше проводять електричний струм ніж оточуюче середовище, зазнають більшої дії тиску виштовхування, спрямованого до зовнішньої поверхні. І, навпаки, частинки з більш вищою провідністю, повинні, в принципі, збиратися біля осі провідника, що буде показано далі на прикладі ініціації силової дії на врівноважені (суспендовані) об'єкти [128, 131].

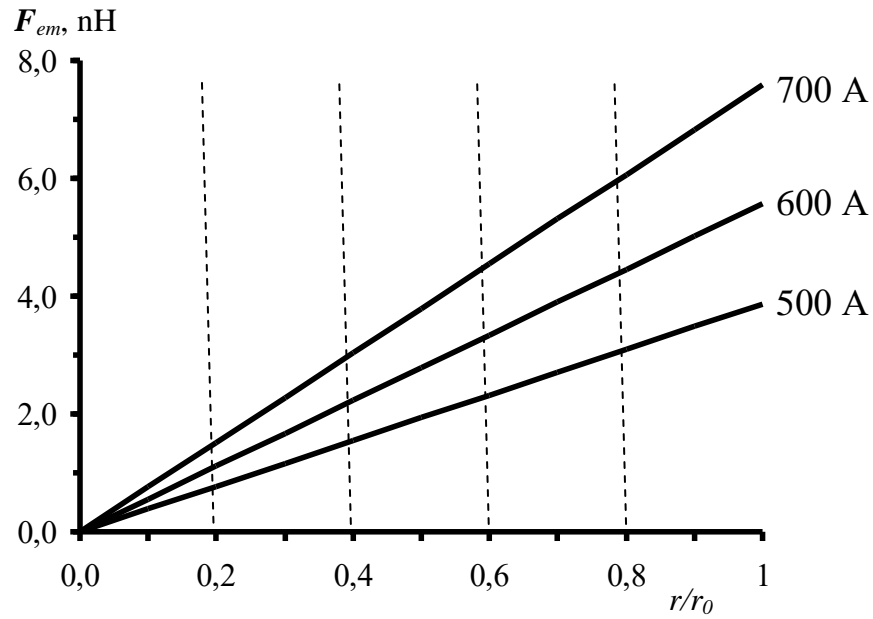


Рисунок 3.5 – Величина сили електромагнітного виштовхування F_{em} для різних величин струму

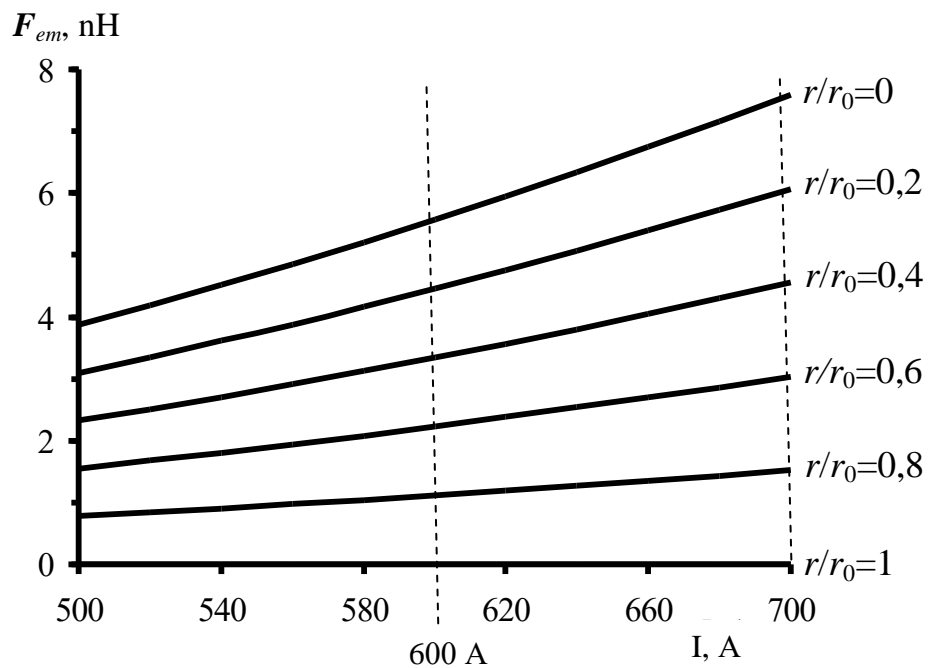


Рисунок 3.6 – Залежність сили електромагнітного виштовхування F_{em} для різних r/r_0

Але при переміщенні твердої частинки на неї буде діяти ще одна додаткова сила в'язкого опору руху згідно із законом Стокса:

$$F_{st} = 6\pi r_i \eta v, \quad (3.9)$$

де η – динамічна в'язкість, v – швидкість твердої частинки.

Прирівняння (3.9) до (3.8) (електромагнітної виштовхувальної сили F_{em}), надає можливості оцінити швидкість переміщення частинки в радіальному напрямку (рисунок 3.2)

$$v = \frac{\mu_0 J^2 r_i^2}{6\eta} \frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i} r. \quad (3.10)$$

Таким чином, тверда частинка, що знаходилася в початковий момент часу на відстані $r=r_s$ від осі, у момент часу t знаходитиметься вже на відстані від осі, рівному:

$$r = r_s \exp\left(\frac{\mu_0 J^2 r_i^3}{6\eta} \left[\frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i}\right] t\right). \quad (3.13)$$

Існування радіальної сили F_{em} (3.8), вносить свій вклад до горизонтального зміщення частинок. Але на частинки, що знаходяться в об'ємі зразка, діє не одна, а дві сили.

Звернемося до чинників, які природньо впливають на переміщення твердих частинок уздовж осьового напрямку. Передусім, на тверду частинку, що має щільність ρ_i та знаходиться в речовині, що розплавилася із щільністю ρ_e , діє звичайна сила Архімеда:

$$F_z \mathbf{i}_z = (\rho_e - \rho_i) g \mathbf{i}_z, \quad (3.14)$$

де $g \cong 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Очевидно і таке, що коли частинки, менш щільні, ніж речовина ($\rho_i < \rho_e$), що оточує їх, то на них діє сила виштовхування, тобто сила (3.14) буде спрямована вгору. Якщо ж щільність частинок більша щільності речовини, що розплавилася, результуюча сила (3.14) буде негативною, тобто буде спрямованою вниз.

Так під час консолідації порошкових композицій завжди є деяка температурна різниця ΔT , наприклад, між основою і верхом зразка (рисунок 3.1) через технологічні неточності

$$\Delta T = |T_b - T_t| \quad (3.15)$$

Це формує умови для можливого початку руху речовини у вертикальному напрямку [132, 133]. Це позначається саме на системі сил, діючих на тверді частинки. Наприклад, якщо температура нижньої частини зразка вища за температуру його верхньої частини, тоді ми маємо позитивний коефіцієнт температурного розширення ($\beta_s > 0$), що створює необхідні і достатні умови для ініціації фізичного процесу природної конвекції [123, 133]. Конвективні струмені, що зароджуються при цьому, здатні захоплювати із собою врівноважені частинки.

Теорія Бенара-Релея, як відомо, описує початок процесу конвекції в середовищі (рідина чи газ) за умов невірноваженого стану системи під дією сил гравітації [123]. Початок процесу в такому стані речовини відносять до порогового типу коли число (критерій подібності) Релея Ra починає перевершувати критичну величину [133]:

$$Ra = \frac{\beta_s \Delta T g h^3}{a_s \nu} \geq Ra_c \cong 1707, \quad (3.16)$$

де β_s – коефіцієнт температурного розширення, ΔT – різниця температур між нижньою і верхньою поверхнями зразка (рисунок 3.1), h – його висота, a_s –

температуропровідність суспендованої суміші, ν – кінематична в'язкість комплексної системи.

В ході експериментів в об'ємі дисперсного тіла створювали градієнт температури у вертикальному напрямку шляхом інтенсивнішого тепловідводу від верхньої частини зразка через верхній електрод-пуансон прес-інструмента (рисунок 3.1).

Різниця температури ΔT складала $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [123]. Оскільки для розплавленого олова і для суспензій на його основі $\beta_s > 0$, була створена передумова для ініціації процесу природної конвекції згідно із (3.16), яка виражається в підйомі більш нагрітої частини речовини від низу до верху. При цьому вгору переміщувалися, як частинки корунду із щільністю $4 \times 10^3\text{ кг/м}^3$, які в 1,7 рази менші від щільності олова ($\rho_e \sim 6,8 \times 10^3\text{ кг/м}^3$), так і частинки нікелевого сплаву із щільністю $\sim 9 \times 10^3\text{ кг/м}^3$, які більше щільності олова в 1,3 рази [69, 70, 71, 72, 92, 94].

Даний результат наводить на думку, що ініційовані від проходження електричного струму електродинамічні ефекти стали причиною переміщення у вертикальному напрямку [123].

Використовуючи дані із роботи [28] для компонентів суспензій, за допомогою формули (3.16) отримали величини чисел Релея (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1. Величини чисел Релея

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

Отримані значення числа Релея (таблиця 3.1) виявилися набагато меншими від критичного значення Ra_c , хоча процес переміщень відбувається [122, 123, 133].

По-перше, в даному випадку відбувалася природним чином конвекція Бенара-Релея [133], що спричинило підняття твердих частинок вгору. По-друге,

в той же час, в перпендикулярних напрямках діяла об'ємна сила Лоренца, спрямована до центру, що обумовлювало радіальний рух [121].

У нашому випадку стану рівноваги, у тому числі і нестійкої, внаслідок наявності крім вертикальних сил існують і в горизонтальному напрямку сили. 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.

Через це однією із рушійних силових дій, що може доповнювати або замінити звичайну термічну обробку може бути практична післядія магнітного і електричного полів під час проходження електричного струму крізь порошкову пресовку в процесі виготовлення виробу або його додаткової обробки.

3.2. Модель елементарної комірки порошкового тіла, що обмежена у просторі

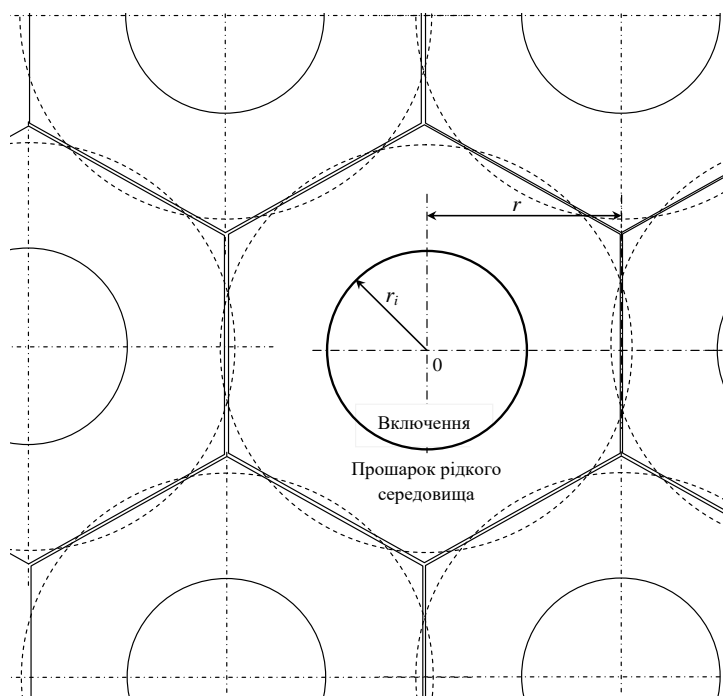
Композиція чи пресовка в якийсь термін часу буде вже складатися із твердих частинок і деякої кількості розплавленої складової за умови проходження постійного електричного струму. За таких умов на межі переходу поверхня твердої частинки – середовище, що оточує, може виникати явище електродинамічної природи [65, 66, 112, 134]. Однією із післядій проходження електричного струму є ефект виникнення своєрідних переміщень речовини всередині елементарної комірки [37, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 67]. Величину (рівень) масообмінних процесів між компонентами комірки можливо описати за допомогою числа (критерія) Шервуда [56, 66, 67].

З практики відомо, що будь-яка механічна суміш дисперсних матеріалів на основі не тільки металів завдяки нагріванню може бути доведена до стану, коли один із компонентів вже розплавився, а інший, маючи більшу температуру плавлення, знаходиться ще у твердому стані. То можуть бути порошкові частинки карбідів, боридів, нітридів, чи алмазні частинки, що вкриті шаром захисного металу [15, 16, 46, 76, 78, 83, 135, 136, 137].

Розташування різних за природою порошкових частинок по об'єму засипки, як на рисунку 1.3, 1.4, 3.7, що є природно-випадковим результатом, можна відтворити деяку початково сталу періодичну послідовність в елементарній будові. Уявну повторюваність в будові можна розділити на такі ж малої величини області. В центрі кожної області буде знаходитися тверда, чи ще не до кінця розплавлена, тобто оплавлена по поверхні порошкова частинка.

Подібного роду елементарна побудова, що обрана, за своєю суттю є гетерогенною одиницею структури. Так зазвичай об'єм порошкового тіла може вміщувати в собі деяку велику кількість твердих, ще не розплавлених компонентів.

В реальності простір навколо дисперсної частинки не є нескінченним, а має умовне граничне окреслення, тобто якесь умовне окреслення елементарного об'єму по периметру. Так можна умовно розділити об'єм порошкового тіла на впорядковану послідовність взаємно зв'язаних елементарних комірок. У центрі кожної комірки буде знаходитися тверда частинка із деяким визначеним радіусом r_i , котру оточує прошарок радіусом половини відстані між центрами відповідно до рисунку 3.7. Загальне просторове накреслення, як впорядкована послідовність комірок схематично показує рисунок 3.7, де видно яким чином можна виділити накреслення моделі комірки. Започаткування надає можливості для здійснення відповідних розрахунків при застосуванні сферичної системи координат.



r_i – радіус частинки, r – середньо врівноважена товщина прошарку.

Рисунок 3.7 – Загальне просторове накреслення комірки

Існує ряд попередніх практичних розв'язань, що намагалися за допомогою математичного апарату і обчислювальних засобів висвітлити питання про взаємодію поверхні окремо взятого твердого тіла із речовиною струмопровідного прошарку, що оточує під час проходження електричного струму [56, 66]. Умови постановки питання під час розв'язання подавали, як переміщення речовини по сферичному прошарку навколо частинки [64].

На практиці так воно і є – будь-яка механічна суміш двох різних за природою дисперсних частинок може бути доведена різноманітними методами нагрівання до стану, коли один із компонентів вже розплавився частково чи повністю, а інший, маючи більшу температуру плавлення, знаходиться ще у твердому [138, 139].

Розглянемо модель елементарної комірки, накреслення якої зображено на рисунку 3.7 [11, 120].

Започаткуємо, що маємо для розглядання тверду сферу з індексом " i " із радіусом r_i та відповідною питомою електропровідністю λ_i , яку огортає прошарок " e " із радіусом $r_e = k r_i$ та своєю питомою електропровідністю λ_e і динамічною в'язкістю η . Відповідно до рисунка 3.7 кожна тверда дисперсна частинка оточена прошарком із іншого за природою компонента, що має радіус який є половиною відстані між центрами частинок (рисунок 3.8) (3.17).

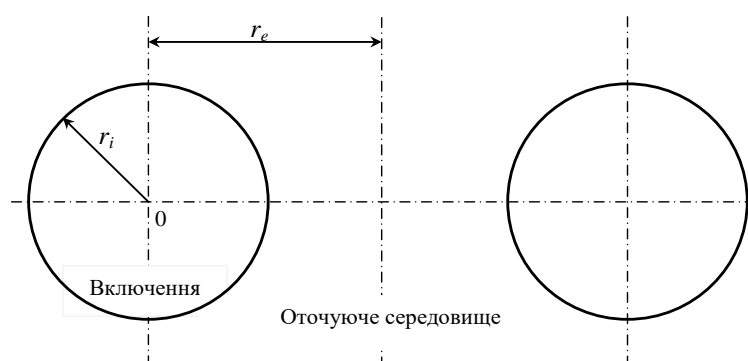
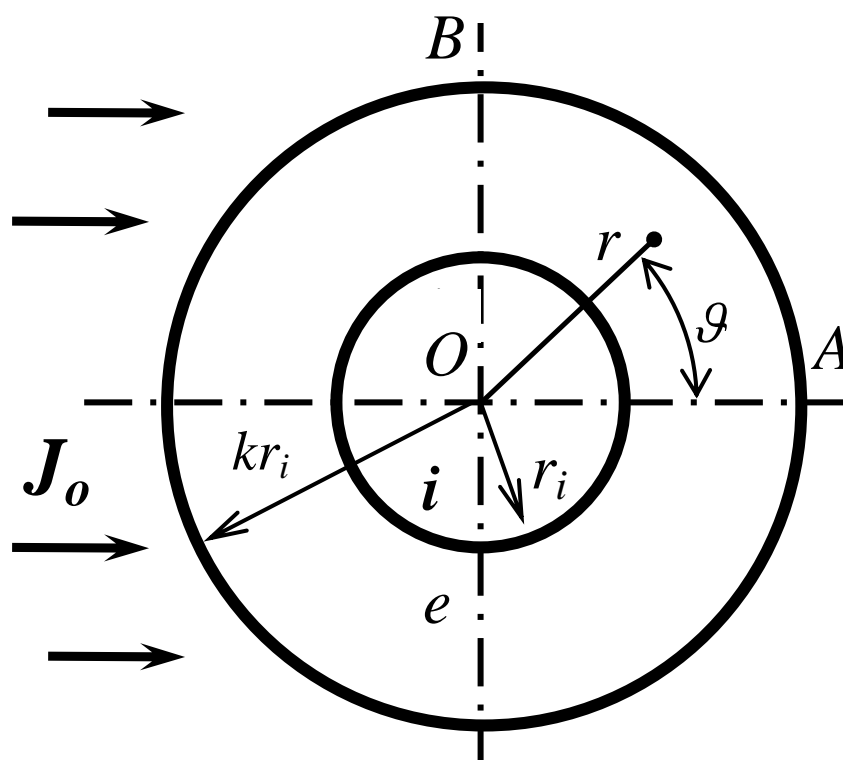


Рисунок 3.8 – Схематичне зображення величини умовного прошарку між частинками

Опираючись на формулу (2.1) можна інакше визначити умови щодо формування товщини прошарку, коли за започаткуванням $k > 1$:

$$r_e = k r_i, \quad (3.17)$$

Початок сферичної системи координат (r, ϑ, φ) розмістимо в центрі сферичної частинки із індексом i . У напрямку OA $\vartheta = 0$ (рисунок 3.9) проходить постійний електричний струм із густиною на деякому віддаленні J_0 [112, 114, 120, 134, 138, 140, 141].



r – радіус-вектор (радіальна координата), ϑ – величина кута, i – тверда частинка, e – струмопровідний прошарок, J_0 – величина густини електричного струму на деякому віддаленні.

Рисунок 3.9. – Модель комірки відповідно до сферичної системи координат

З метою здійснення процесу моделювання щодо проходження процесів тепло- і масоперенесення, співвідношення у композиційній суміші бралось за умов, які повинні були б забезпечувати відносну товщину прошарку більш легкоплавкої компоненти не менше як 1. Це значить, що використовуваний коефіцієнт для товщини прошарку (в елементарній об'ємній одиниці) має бути наступним:

$$k = \frac{r_e}{r_i} \geq 1 \quad (3.18)$$

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 (величина її радіус-вектора, тобто радіальної координати) – половина найменшої відстані між центрами сусідніх твердих частинок [11].

При такому схематичному розташуванні компонентів елементарної комірки видно наступне – завжди буде присутнім ефект відмінності електричних провідностей між компонентами, тобто завжди має бути два "різнополярні" випадки:

- в першому випадку електрична провідність твердої частинки завжди більша, ніж електрична провідність речовини, що розплавилася;

- у другому випадку все навпаки - електрична провідність твердої частинки завжди менша ніж електрична провідність речовини, що розплавилася.

Дані зауваження важливі з точки зору того, що даний ефект на практиці (як показали проведені теоретичні і практичні дослідження) "контролює" перерозподіл електричного струму навколо твердої частинки в прошарку, що оточує [42, 54, 66, 67]. Цей ефект є, насамперед, одним із важливих важелів, який може контролювати процес усадження (ущільнення) зразка під час проходження електричного струму крізь порошкову суміш [6, 15, 77, 102, 117, 142, 143].

Ґрунтуючись на поданні для діелектричних речовин, як у [144], аналогічно можна отримати визначення для густини електричного струму для сферичного прошарку e [134]:

$$J = J_0 \left(1 - A^3 \frac{r_i^3}{r^3} \right) \cos \vartheta_{i_r} - J_0 \left(1 + \frac{1}{2} A^3 \frac{r_i^3}{r^3} \right) \sin \vartheta_{i_\theta} \quad (3.19)$$

де

$$A = \left(2 \frac{\lambda_e - \lambda_i}{2\lambda_e + \lambda_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.20)$$

λ_i, λ_e – електропровідності компонентів; i_r, i_θ – орти.

Після модифікації у вигляді [114, 138, 139, 141]:

$$J = J_o \left(1 - \frac{(r'_i)^3}{r^3} \right) \cos \vartheta i_r - J_o \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(r'_i)^3}{r^3} \right) \sin \vartheta i_\vartheta \quad (3.21)$$

де $r'_i = r_i \cdot A$ (3.22)

– вводиться як деякий множник, котрий уподоблює собою деякий "ефективний" радіус твердої частинки. Для магнітного поля, що виникає від проходження струму можна отримати [66, 134, 138, 139]:

$$H = \frac{\mu_o J_o r}{2} \left(1 - \left(\frac{r'_i}{r} \right)^3 \right) \sin \vartheta i_\varphi, \quad (3.23)$$

Подане формулювання відрізняється від поданого в [64], де розглядається непровідна частинка, тим, що в нашому випадку замість звичайного радіусу r_i введена і фігурує величина, яка відображає ефективний радіус r'_i , що вже залежить від усередненої електропровідності двокомпонентної системи.

В нашому розгляданні функцію Стокса застосуємо для розрідженого (оплавленого) середовища, уподоблює собою прошарок, що є обмеженим у просторі.

Висунута на розглядання функціональна залежність враховує радіус твердої частинки, густину електричного струму, в'язкість прошарку та електропровідності компонентів [140].

Аналогічно до [69] стає можливим написання функції Стокса у вигляді, що враховує геометричні і електрофізичні параметри [11, 112, 114, 120, 134, 138, 139, 141]:

$$\psi = -\frac{\mu_o \mu_e J_o^2 r_i'^5}{16 \eta} \left[\frac{r'_i}{r} + \left(\frac{r}{r'_i} \right)^2 + C_1 \left(\frac{r'_i}{r} \right)^2 + C_2 + C_3 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^3 + C_4 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^5 \right] \sin^2 \vartheta \cos \vartheta, \quad (3.24)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі, що отримані після вирішення лінійної системи, які залежать від r, k, Λ і їх вигляд визначається на основі відповідних граничних умов; μ_e – відносна магнітна проникність речовини, що розплавилася [19, 69].

З метою спрощення опису поставленої задачі можна провести математичні розрахунки тільки для приведеної функціональної залежності, яка є аргументом $r'=r/r_i$ та кута \mathcal{G} і має наступний вигляд:

$$\Psi = - \left[\frac{r'_i}{r} + \left(\frac{r}{r'_i} \right)^2 + C_1 \left(\frac{r'_i}{r} \right)^2 + C_2 + C_3 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^3 + C_4 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^5 \right] \sin^2 \mathcal{G} \cos \mathcal{G}, \quad (3.25)$$

де відповідно
$$\Psi = \psi \frac{16 \eta}{\mu_0 \mu_e J_0^2 (r'_i)^5} \quad (3.26)$$

Температуру в комірці, що складається із твердого центру і прошарку розплавленої речовини будемо вважати сталою, тобто рівномірно розподіленою по об'єму у визначений момент часу. Інакше, врахування подібної фізичної характеристики речовини призведе до додаткового ускладнення математичних викладок. Поки що це не є метою в визначенні умов вирішення задачі.

Визначення для компонентів швидкості можуть мати форму, як для диференціювання загального вигляду функції Стокса (3.25) по обраним аргументам [11, 112, 114, 120, 134, 138, 139, 141]:

$$\left. \begin{aligned} v_r &= \frac{1}{r^2 \sin \mathcal{G}} \frac{\partial \Psi}{\partial \mathcal{G}} = - \frac{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^3}{16 \eta} \left[\left(\frac{r'_i}{r} \right)^3 + 1 + C_1 \left(\frac{r'_i}{r} \right)^4 + C_2 \left(\frac{r'_i}{r} \right)^2 + C_3 \frac{r}{r'_i} + C_4 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^3 \right] (3 \cos^2 \mathcal{G} - 1), \\ v_{\mathcal{G}} &= - \frac{1}{r \sin \mathcal{G}} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = \frac{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^3}{16 \eta} \left[- \left(\frac{r'_i}{r} \right)^3 + 2 - 2C_1 \left(\frac{r'_i}{r} \right)^4 + 3C_3 \frac{r}{r'_i} + 5C_4 \left(\frac{r}{r'_i} \right)^3 \right] \sin \mathcal{G} \cos \mathcal{G}. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Опираючись на попередні зауваження щодо спрощення подання і подальших математичних розрахунків без погіршення ступеня опису, компоненти (3.27) можна записати точно у вигляді, як для приведених значень.

$$\left. \begin{aligned} V_r &= v_r \cdot \frac{16\eta}{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^3} \\ V_g &= v_g \cdot \frac{16\eta}{\mu_0 \mu_e J_0^2 r_i^3} \end{aligned} \right\}, \quad (3.28)$$

Значення ж приведеної швидкості переміщення по прошарку можна обраховувати у формі, що може бути приведена до безрозмірності:

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_g^2}, \quad (3.29)$$

Граничні умови на внутрішній і зовнішній поверхнях сферичного прошарку коли $r=r_i$ та $r=r_e$ формують сталі C_1, C_2, C_3, C_4 та подальше написання визначень поля концентрацій, градієнту концентрацій та величини критерію Шервуда [112].

На початку розглянемо більш спрощений варіант граничних умов, який призведе до достатньо прийняттого рішення при розгляданні загальної картини динаміки речовини під дією електричного струму.

Ступінь фізичної взаємодії між речовиною, яка формує матрицю, що плавиться та компонентом більш тугоплавким суттєво впливає на зародження і розвиток фактичних ефектів, що виникають через дію сил електричної природи на речовину [67, 120, 144].

В розгляданні подається комплексне середовище, що подумки поділене на окремі ділянки, в центрі кожної з яких знаходиться тверда частинка, що огорнута розплавленою речовиною. Прошарок в окресленій ділянці, буде поверхнею поліедра. Таке геометричне угруповання ми умовно замінимо сферичною поверхнею із радіусом відповідно до рисунку 2.1 та рисунку 4.1 коли виконується умова, що $k>1$ [134].

За прийнятних умов радіальна компонента швидкості v_r при переміщенні речовини на зовнішній поверхні прошарку, коли $r=kr_i$, перетворюється в нуль.

Тобто через окреслену межу між суміжними областями речовина не переходить. Відносно тангенціальної компоненти v_g прийнемо таку ж умову. Вона співпадає із тангенціальною складовою при $r=kr_i$, як і в моделі для безмежного простору [53, 54, 55, 64, 65, 66, 67, 134].

Будемо виходити із граничних умов, при яких є відсутнім ефект прослизання по поверхні твердої компоненти і на зовнішній умовно прийнятій граничній лінії (периметру) комірки:

$$\left. \begin{aligned} v_r|_{r=r_i} = 0, \quad v_r|_{r=kr_i} = 0, \\ v_g|_{r=r_i} = 0, \quad v_g|_{r=kr_i} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

В даному випадку назва елементарної комірки буде звучати, як "жорстка комірка" – "ж.к.", або умови "ж.к."

Започатковані граничні умови "ж.к." (3.30) ведуть до системи лінійних рівнянь. При вирішенні системи лінійних рівнянь з урахуванням умов "ж.к." можливо отримати сталі $C_{1,2,3,4}$ [120, 134]:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{k}{\Lambda^4 K} [\Lambda^3 (-2k^9 + 20k^6 - 18k^5 + 20k^3 - 2) + 4k^9 - 9k^8 + 10k^6 - 9k^4 + 4k^3] \\ C_2 &= \frac{1}{\Lambda^2 k K} [\Lambda^3 (-2k^{11} + 30k^7 - 28k^6 - 28k^5 + 30k^4 - 2) - \\ &\quad - 8k^{11} + 15k^{10} - 7k^8 - 7k^6 + 15k^4 - 8k^3], \\ C_3 &= \frac{\Lambda}{k K} [\Lambda^3 (5k^8 - 12k^7 + 7k^6 + 7k^2 - 12k + 5) - 6k^{10} + 20k^8 - 14k^6 - 14k^5 + 20k^3 - 6k] \\ C_4 &= \frac{\Lambda^3}{k K} [\Lambda^3 (-3k^6 + 8k^5 - 5k^4 - 5k^2 + 8k - 3) + 2k^8 - 12k^6 + 10k^5 + 10k^4 - 12k^3 + 2k^2] \end{aligned} \right\}, \quad (3.31)$$

При використанні значень фізичних властивостей компонентів в елементарній комірці і підстановку їх у (3.25) можливо обрахувати та отримати розподіл приведеної функції Стокса по прошарку навколо твердої частинки при використанні граничних умов (3.30).

З метою обґрунтування особливостей розподілу приведеної функції Стокса, розрахунки проводилися для двокомпонентних порошкових композицій. Відмінність при проведенні розрахунків з метою порівняння полягає в тому, що в першій обраній системі мідь-олово (Cu-Sn) при температурі ~ 350 °C компонента, яка слугує центром комірки має більшу електропровідність ніж розплавлене олово. Для двокомпонентної системи цирконій-натрій (Zr-Na) при температурі ~ 120 °C все навпаки – цирконій має меншу електропровідність від розплавленого натрію при температурі трохи вище від температури плавлення (таблиця 3.2) [69, 70, 71].

Таблиця 3.2 – Вихідні параметри для обраних систем

Компонент	Радіус, r_i , мкм	Коеф. комірки	Електропровідність, λ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	Знак комплексного множника, A (3.20)	Густина струму, J_0 , А м ⁻² (А см ⁻²)	Температура, °C
Cu	25	2	$24,95 \times 10^6$	-	$1,0-1,5 \times 10^6$ (100-150)	~ 350 °C (340-400 °C)
Sn	--		$1,78 \times 10^6$			
Zr	25		$1,40 \times 10^6$	+		120-127 °C
Na _{рід}	--		$5,23 \times 10^6$			

На такий підхід вказує знак комплексного множника (3.20), що формує узагальнену провідність системи та входить до складу ефективного радіусу.

За основу проведення розрахунків візьмемо звичайний випадок реалізації процесу консолідації дисперсної двокомпонентної суміші під дією електричного струму компоненти якої використовують при виготовленні промислового призначення сегментів, що вміщують алмаз-абразивні частинки, як елементи структури [26, 28, 29, 57, 74, 87, 117, 137, 143]. Тверді частинки, що є компонентами металевого матричного каркасу на практиці мають діаметр 50-55 мкм, є сферичними частинками міді.

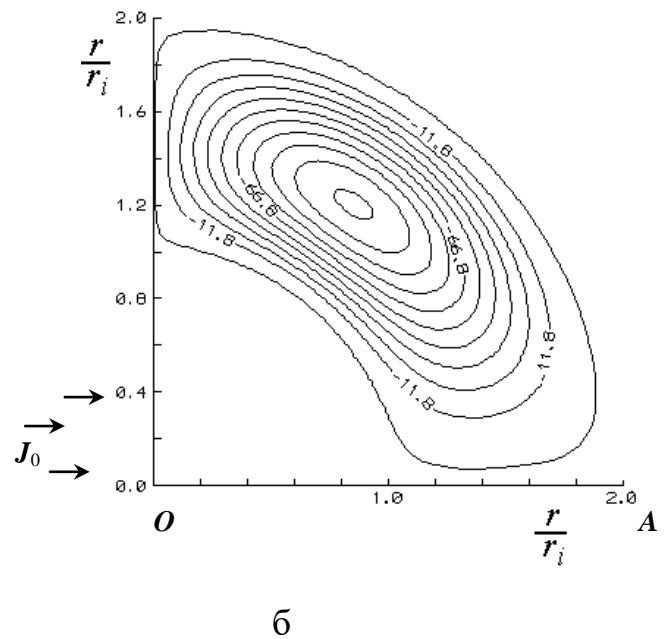
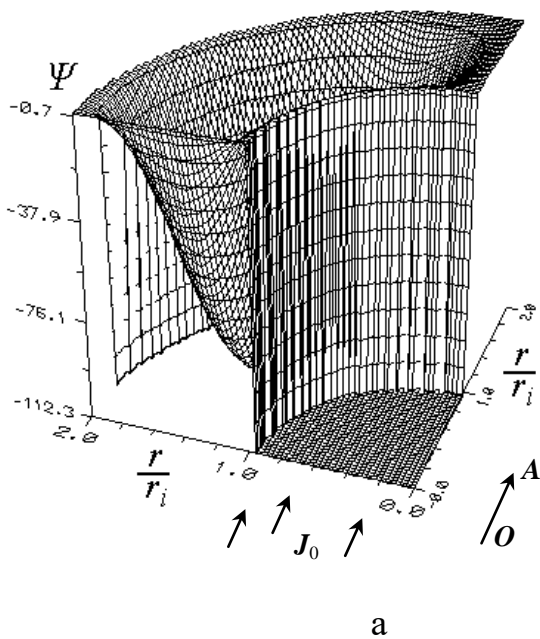
З метою зменшення дії коефіцієнта комірки, як динамічного показника під час процесу консолідації дисперсного тіла, започаткуємо таке. Для

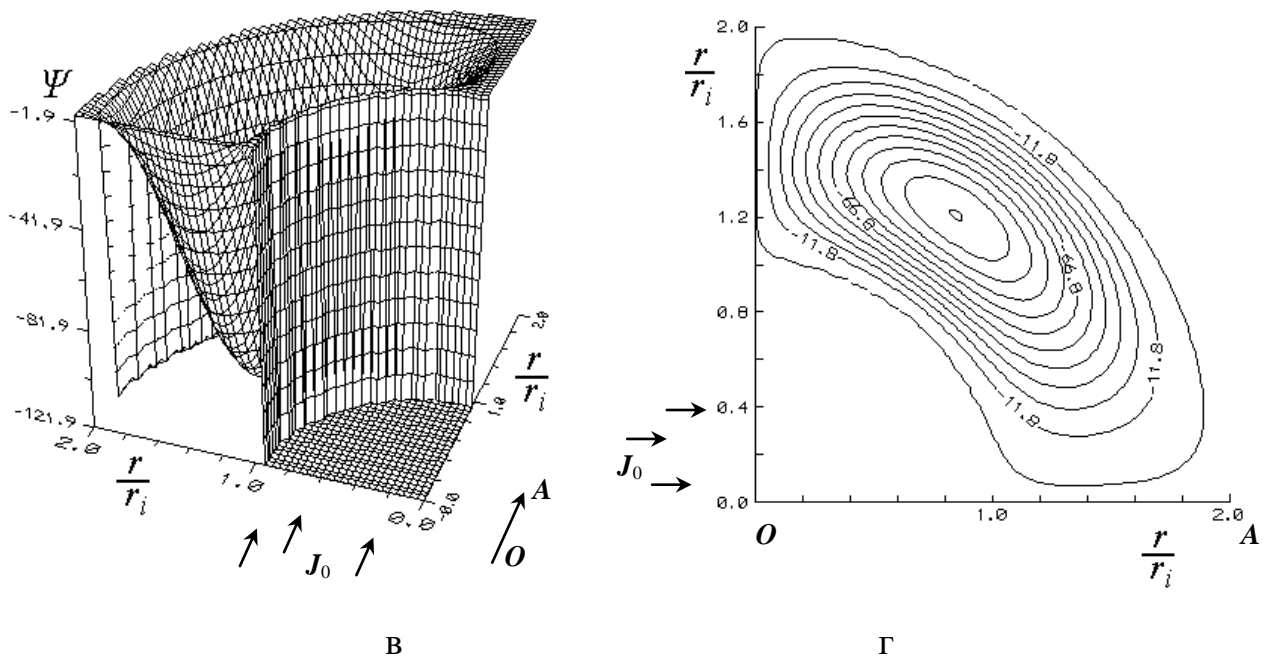
здійснення аналізу під час проведення розрахунків, концентрація компонентів у системі буде наступною – 12,5% по об'єму складатиме тверда компонента, а 87,5% компонента, що буде формувати прошарок при $k=2$.

Результат проведених розрахунків при використанні оригінального типу програми для таблиці 3.2 показує рівнозначне відображення формування поля приведеної функції Стокса для першого квадранту (рисунок 3.10).

Побудови для одного квадранту достатньо завдяки (як було сказано раніше) геометричній симетрії системи сферичної системи координат. Симетрія в побудові і гладкість функціональної залежності виходить із застосування способу отримання.

Збільшення різниці між електропровідностями компонентів (таблиця 3.3) вказує на те, що чим більша її величина (по модулю), тим більше значення приведеної функції Стокса (по максимуму) можна отримати (рисунок 3.10).





а, б – мідь-олово (Cu-Sn); в, г – цирконій-натрій (Zr-Na).

Рисунок 3.10 – Розподіл приведенної функції Стокса

У свою чергу це повинно ініціювати більші збурення в прошарку, що оточує тверду частинку. Початковий підхід було показано в [56, 66, 67] і потім удосконалено в [112, 121, 130, 134, 138, 139, 145].

"Чисельна висота" рівень функції вказує на формування розподілу приведенної функції Стокса, як функції, що залежить від фізичних властивостей компонентів. Подібне накреслення ізоліній приведенної функції Стокса було розглянуто достатньо докладно в [56, 66, 67], але для моделі нескінченного простору. При застосуванні окресленої моделі ізолінії функції мають кільцевий вигляд (рисунок 4.2) [112].

Таблиця 3.3 – Значення приведеної функції Стокса

Складники комірки	Величина різниці між електропровідностями компонентів, $\times 10^{-6}$, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Значення функції Стокса (по модулю)		
		максимальне	мінімальне	"Чисельна висота"
Мідь-олово (Cu-Sn)	23,17	112,3	0,7	111,6
Цирконій-натрій (Zr-Na)	-3,83	121,9	1,9	120,0

Співвідношення (3.27) втілює звичайний підхід під час вирішення задачі, що дозволяє визначити картину поля повних переміщень по прошарку та побудувати відповідні 3D графічні інтерпретації. Результати розрахунків у формі епюр, що побудовані за допомогою складеної власноруч комп'ютерної програми оригінального типу, яка враховує граничні умови (3.30) (умови "ж.к.") подані на рисунку 3.11 [11, 120, 140].

Після перегляду графічних побудов, що на рисунку 3.11, та рисунку 3.12 можливо зробити висновок, що в об'ємі прошарку будуть формуватися області де відбуватиметься "підведення" або ж "відведення" речовини по відношенню до твердого компонента. Такі масопереміщення повинні інтенсифікувати процеси взаємодій. Ініціація направленою руху речовини автоматично призведе до прискорення розчинення матеріалу твердої компоненти в речовині, що її оточує.

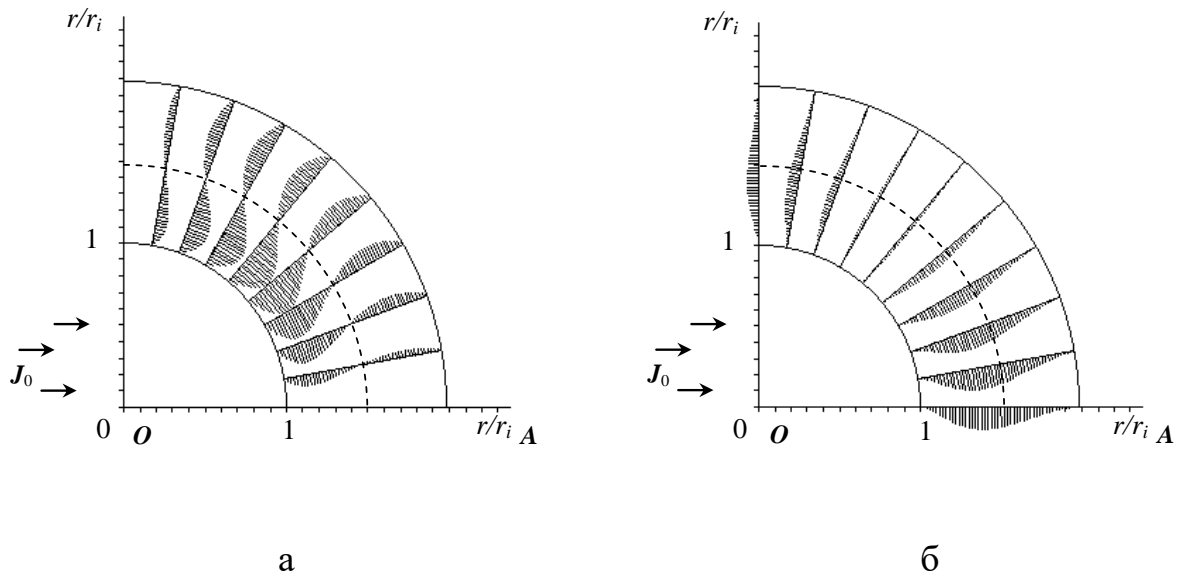


Рисунок 3.11 – Епюри для V_g (а) і V_r (б) для кутів із кроком $\Delta\vartheta=10^0$ для прошарку в системі Cu-Sn

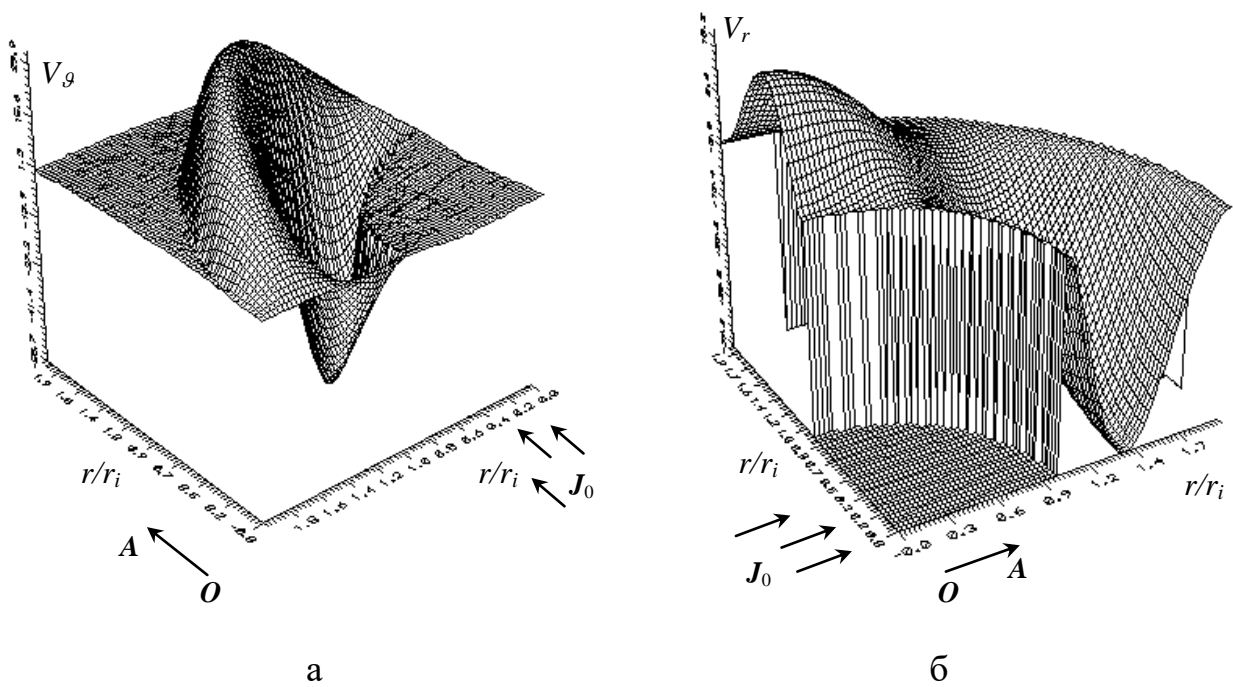


Рисунок 3.12 – 3D побудови V_g (а) і V_r (б) для 1-го квадранту системи Cu-Sn

Аналіз графічних накреслень і розрахункових даних показує, що матиме місце формування кільцевої лінії (криволінійний периметр) із центром, розташованим на лінії під кутом у 54.7^0 , який був визначеним на основі

отриманого масиву числових значень для 1-го квадранту. Це буде центр нульового масопереміщення, де компоненти швидкості $V_g=V_r=0$.

Підтвердженням є відповідна графічна побудова для 1-го квадранту при застосуванні формул (3.3) із врахуванням граничних умов (3.30). На рисунку 3.13 показано інтерпретацію розрахунків як 3D реконструкція розподілення величини загальної приведенної швидкості переміщення речовини по прошарку.

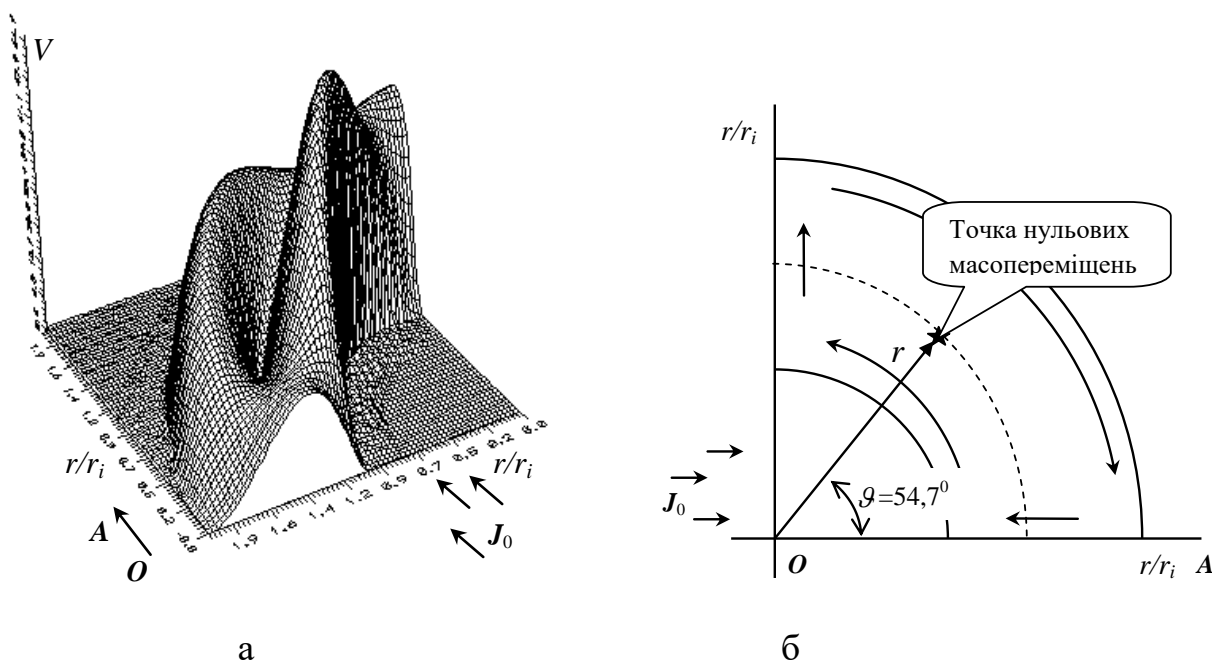


Рисунок 3.13 – Побудова розподілу приведенної швидкості (а) та ймовірний напрямок переміщень по прошарку (Cu-Sn)

Можна накреслити ймовірний потік переміщення речовини по області сферичного прошарку комірки. Для 1-го квадранту комірки показує рисунок 3.13б. Радіус r – величина відстані до центральної кільцевої лінії уявного тора (якщо брати до уваги 3D інтерпретацію, чого нема у нашому розгляданні щоб не обтяжувати текст дисертаційної роботи), котрий утворюється завдяки переміщенню речовини по прошарку. Подібна фізична картина переміщення слугує інтенсифікатором процесів масообміну між твердою поверхнею і речовиною, що розплавилася [120].

Використовуючи формулювання для розрахунку компонент приведених швидкостей V_θ та V_r (4.13) для кутів $0^\circ < \theta < 90^\circ$ можливо отримати достатньо повну картину щодо напрямку та величини повної приведеної швидкості у вибраній точці прошарку [11, 112].

Результатом застосування підходу, аналогічного, коли було отримано розподіл складових приведеної швидкості для 1-го квадранту системи Cu-Sn із обраним коефіцієнтом комірки $k=2$ може показати напрямок попередньо прогнозованих переміщень по сферичному прошарку. Використання власноруч складеної програми, із врахуванням (3.30) (граничні умови "ж.к.") дозволяє намалювати ймовірний шлях, що і зображено на рисунку 3.14.

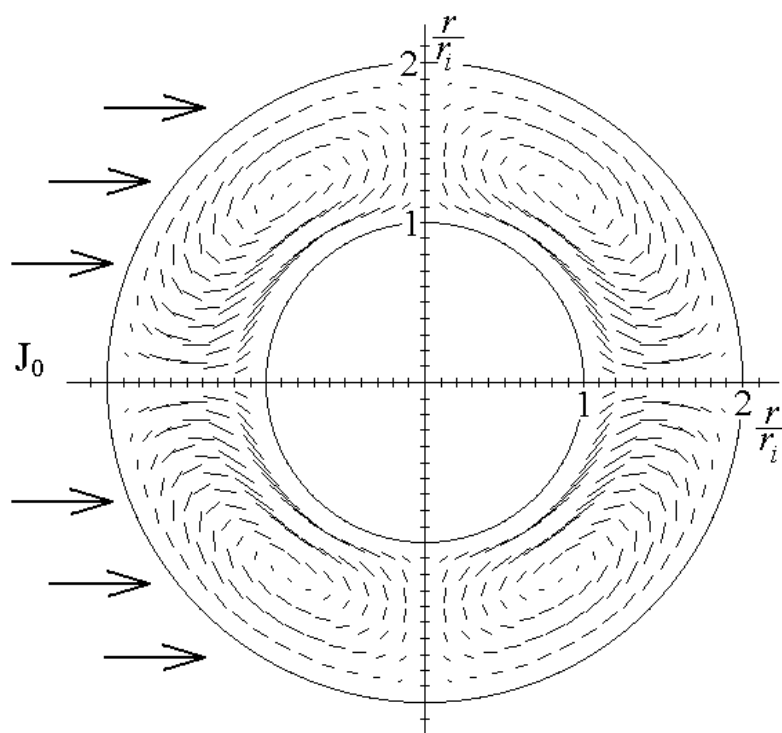


Рисунок 3.14 –Картина векторів, що показують напрямок і величину повної приведеної швидкості для Cu-Sn

Повна картина переміщення речовини навколо по сферичному прошарку, отримана шляхом відповідного відображення результату розрахунків. Таке можливе тому, що модель елементарної комірки ґрунтується на взаємній симетрії, яка є в обраній сферичній системі координат.

Використання граничних умов (3.30) при яких ефект руху речовини на твердій поверхні є відсутнім і на зовнішній межі комірки – може бути тільки початковим кроком. Початкові граничні умови під час вирішення задачі деяким чином повинні змінитися, щоб більш точно відповідати практичним результатам.

Це буде виглядати наступним чином [120, 138, 139]:

$$\left. \begin{aligned} v_r|_{r=r_i} = 0, \quad v_r|_{r=kr_i} = 0, \\ v_g|_{r=r_i} = 0, \quad v_g|_{r=kr_i} = v_{g,\infty}|_{r=kr_i}, \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

де $v_{g,\infty}$ – величина компоненти переміщення речовини, що співпадає із моделлю тверда частинка – безмежжя речовини, що колись була започаткована і подана на розглядання в [66, 134].

Відкоректовані граничні умови та зміни започаткувань показано в таблиці 3.4.

В запропонованих, як започаткування (таблиця 3.4), граничних умовах назва елементарної комірки буде звучати, як "м'яка комірка" – умови "м.к." [138, 139].

Таблиця 3.4 – Зміни у започаткуванні граничних умов

№	Визначення	Умовне позначення	Ефект
(3.30)	Відсутність прослизання буде на поверхні частинки і на зовнішній межі прошарку.	"ж.к."	Не буде обміну маси речовини між сусідніми комірками
(3.32)	Відсутність прослизання буде тільки на поверхні частинки. На зовнішній межі прошарку буде здійснюватися переміщення речовини з кінцевою швидкістю	"м.к."	Буде сприяття деякому обміну маси речовини між сусідніми комірками

Відповідно зміниться і саме написання сталих $C_{1,2,3,4}$, що фігурують у рівняннях (4.12). Для нових граничних умов (4.17) написання сталих після вирішення лінійної системи рівнянь буде наступним для умови "м.к." [114, 141]:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{K \Lambda^4} [\Lambda^3 (-2k^{10} + 20k^7 - 15k^6 - 21k^5 + 15k^4 + 5k^3 - 2) + \\ &\quad + 4k^{10} - 15k^9 + 20k^7 - 3k^5 - 10k^3 + 4], \\ C_2 &= \frac{1}{\Lambda^2 k^2 K} [\Lambda^3 (-2k^{12} + 25k^8 - 23k^7 - 21k^6 + 23k^5 - 4k + 2) - \\ &\quad - 8k^{12} + 25k^{11} - 21k^9 - 17k^7 + 29k^5 - 4k^4 - 4], \\ C_3 &= \frac{\Lambda}{k^2 K} [\Lambda^3 (5k^9 - 10k^8 + 5k^7 - 5k^2 + 10k - 5) - \\ &\quad - 10k^{11} + 20k^9 - 10k^7 + 10k^4 - 20k^2 + 10], \\ C_4 &= \frac{\Lambda^3}{k^2 K} [\Lambda^3 (-3k^7 + 6k^6 - 3k^5 + 3k^2 - 6k + 3) + \\ &\quad + 6k^9 - 12k^7 + 6k^5 - 6k^4 + 12k^2 - 6], \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Необхідні для здійснення розрахунків характеристики фізичних властивостей компонентів відповідно до параметрів фізичних умов проведення експериментів були взяті з [69, 70, 71, 197, 146, 147] і зведені до таблиці 3.5 [138].

Таблиця 3.5 – Параметри компонентів і розмір комірки

Складники	Радіус твердої частинки, r_i , м	Коефіцієнт комірки, k	Початкова доля твердої компоненти, об. %	Густина струму, J_0 , А/м ²	Темпера- тура, °С
Cu-Sn	$\sim 35 \times 10^{-6}$	2	12,50	$4,0 \times 10^6$	727
Cu-Al		4	1,56		

Підставивши у розрахункову програму, що ґрунтується на використанні формул із врахуванням граничних умов "м.к." (3.32) можна обчислити шлях і напрямок в вибраній точці ймовірного переміщення речовини. Схематична інтерпретація напрямку переміщень по прошарку у 1-му квадранті і утворенню поля безрозмірних нормалізованих (приведених) значень у квазівекторному вигляді показана на рисунку 3.15 [138, 139].

Накреслення на рисунку 3.15 є фактично звичайним векторним графіком на площину у напрямку OA за умови "м.к.". Компонента швидкості переміщення v_r біля прямої $\vartheta=0$ набуває від'ємного значення починаючи з кута $\vartheta=54,7^\circ$, та опираючись на попередні умови "ж.к." (3.30) щодо вирішення поставленої задачі, як на рисунку 3.11 та рисунку 3.14. Максимальна від'ємність значення v_r в основному залежить від величини A , тобто від різниці між електропровідностями твердої поверхні і речовиною, що розплавилася і оточує.



Рисунок 3.15 – Векторне поле напрямку переміщень для $k=2$ в $Cu-Sn$

Факт накреслення (рисунок 3.15) свідчить про наявність направлено переміщення речовини у напрямку AO до твердої поверхні і

віднесення її у напрямку OB , перпендикулярному до напрямку AO , що було початково показано за умов "ж.к." (таблиця 3.4) [120].

Використовуючи узяті із літературних джерел фізичні властивості компонентів (таблиця 3.2, 3.4) [69, 70, 71, 97, 146, 147] було проведено обчислення ймовірної величини переміщення речовини, що розплавилася. В даному випадку його утворило олово (Sn), як прошарок навколо більш тугоплавкої компоненти із міді (Cu) під дією електричного струму. Основними параметрами проведення розрахунків та з метою порівняння їх із практикою використали підхід при формуванні граничних умов (3.32) (умови "м.к.") і підстановки їх основи у формули [138, 139].

Обробка результатів обчислень показала, що швидкість переміщення речовини по прошарку розплавленого олова має результат $3-3,5 \times 10^{-6}$ м/с (3-3,5 мкм/с), що був показаний попередньо у тексті [112, 113, 114, 140, 148]. При такому "розгоні" перенесення речовини більш тугоплавкого компоненту повинно проходити достатньо швидко, що і підтверджується практичними дослідженнями [113, 148].

З метою обґрунтування, яким чином може впливати концентрація більш тугоплавкої компоненти на зміну картини переміщення речовини по навколишньому прошарку, було проведено відповідні розрахунки. У розглядання було взято двокомпонентну порошкову суміш на основі мідь – алюміній (Cu-Al) де коефіцієнт комірки сягав $k=4$ (таблиця 3.5). Вибір компонентів, передусім, був пов'язаний із науково-дослідницькими роботами, що велися на відповідно до [120, 121].

Результат порівняння повинен показати принципову картину можливої зміни напрямку у накреслень переміщення речовини по прошарку під час процесу консолідації.

Використовуючи оригінального типу розрахункову комп'ютерну програму на основі умов "м.к." (3.32) було побудовано векторного типу накреслення розподілу поля повних напрямків переміщень в 1-му квадранті при $k=4$ (рисунок 3.16) [114, 141].

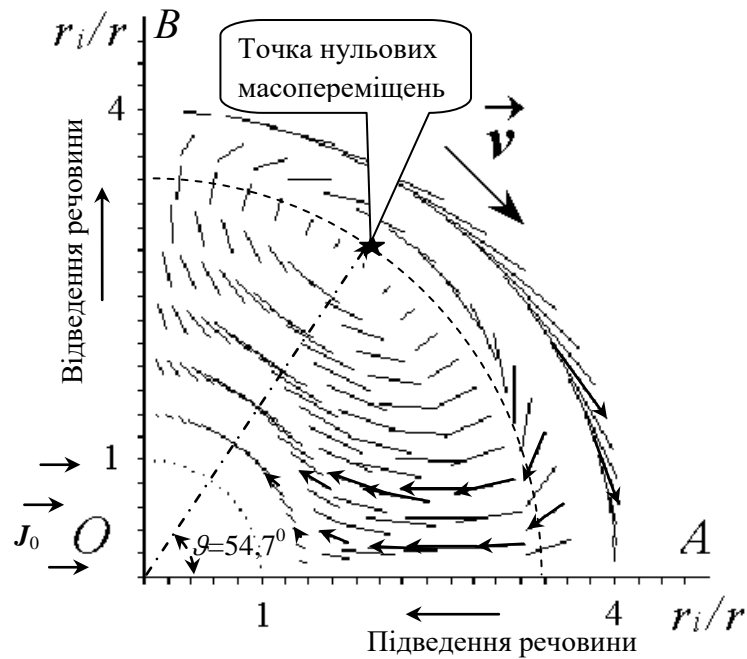


Рисунок 3.16 – Векторне поле напрямку переміщень для $k=4$ в Cu-Al

Порівняння графічних побудов двох рисунків при $k=2$ (рисунок 3.15) і при $k=4$ (рисунок 3.16) виявляє фактичну однаковість графічних зображень. Для обох значень коефіцієнта комірок зберігається також і ефект підведення речовини в напрямку AO , коли величина швидкості набуває від'ємного значення [114, 141].

Вигляд накреслень на рисунках 3.13-3.16 надає можливості передбачити яким чином буде йти перерозподіл речовини поверхні твердої частинки в речовину, що розплавилася.

Умова при вирішенні задачі витікає із використання методу Левича. Викладене там розв'язання працює тільки для товщини прошарку до $(r-r_i) \leq 0,1$ (більш змістовно це описано в [61, 63]).

Попередньо можемо записати функцію Стокса у вигляді [138, 139]:

$$\psi \cong -\frac{\mu_0 \mu J_0^2 r_i^{5.5}}{16 \eta} f(\Lambda, k) \cdot (r-r_i)^2 \sin^2 \vartheta \cos \vartheta, \quad (3.34)$$

Форма функціональної залежності $f(\Lambda, k)$, безумовно буде ґрунтуватися на умовах постановки задачі (3.30) і (3.32) та сталих C_1 - C_4 . Спочатку написання функціональної залежності $f(\Lambda, k)$ отримаємо для більш спрощених граничних умов "ж.к." (3.30):

$$f(\Lambda, k)|_{\text{ж.к.}} = 1 + \Lambda^3 + \frac{1}{K} \left[\Lambda^3 \left(-6k^{10} + 75k^7 - 90k^6 - 63k^5 + 140k^4 - 50k^3 - 35k + 44 - \frac{15}{k} \right) + 12k^{10} - 45k^9 + 110k^7 - 189k^5 + 70k^4 + 100k^3 - 60k^2 + 2 \right], \quad (3.35)$$

та для граничних умов "м.к." (3.32):

$$f(\Lambda, k)|_{\text{м.к.}} = 1 + \Lambda^3 + \frac{1}{k^2 K} \left[\Lambda^3 \left(-6k^{12} + 75k^9 - 75k^8 - 78k^7 + 105k^6 - 15k^5 + 9k^2 - 30k + 15 \right) + 12k^{12} - 75k^{11} + 180k^9 - 159k^7 + 30k^5 - 30k^4 + 72k^2 - 30 \right], \quad (3.36)$$

$$\text{де } K = 4k^{10} - 25k^7 + 42k^5 - 25k^3 + 4.$$

Наступним кроком є використання рівняння для опису процесів при стаціонарній дифузії електроконвективного типу в речовину, що розплавилася (прошарок) із формою написання, що подана в [11, 114, 120, 141].

Ймовірно, що для випадку обрання незначної товщини сферичного прошарку ($r_e - r_i$), який все ж таки на практиці є набагато товщим від товщини дифузійного прошарку, що береться у розглядання в [112], можна отримати відповідне рішення при застосуванні граничних умов:

$$\left. \begin{array}{l} c|_{r=r_i} = c_s \\ c|_{r \rightarrow \infty} = c_0 \end{array} \right\}, \quad (3.37)$$

відповідно до умов вирішення задачі і незалежно від типу умов "ж.к." комірка чи "м.к." подані, наприклад, в [112, 114, 141] є наступним і подібним до (1.9):

$$\frac{c_s - c}{c_s - c_0} = \frac{3}{\Gamma(1/3)} \int_0^{\zeta_0} \exp\left(-\frac{4}{9}\zeta^3\right) d\zeta, \quad (3.38)$$

де $c_s = c|_{r=r_i}$ – концентрація речовини на поверхні твердого тіла, $c|_{r \rightarrow \infty} = c_0$ – концентрація речовини твердої компоненти на деякому віддаленні від поверхні в глибині прошарку; $\Gamma(1/3)$ – значення звичайної гамма функції.

Верхня межа інтегрування (3.38) отримана у вигляді такому, що написання функціональної залежності $f(\Lambda, k)$ відповідає взятим у практичне розглядання граничних умов (3.30) чи (3.32) для накреслення елементарної комірки.

Як було зазначено, відповідно до (3.38) та [61], на практиці розрахунки можна проводити із достатнім ступенем точності тільки для величини прошарку від r_i до $1,1r_i$ коли $(r_e - r_i)$ є набагато більшою від товщини дифузійного прошарку, який береться у розглядання [112].

$$\zeta_0 = \left\{ \frac{5\mu_0 \mu J_0^2 r_i^4 (r - r_i)^3 \sin^3 \vartheta \cos^{\frac{3}{2}} \vartheta}{2^6 \eta D \left[2\sqrt{2} E\left(\alpha, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) - \sqrt{2} F\left(\alpha, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) - \sin \vartheta \cos^{\frac{3}{2}} \vartheta \right]} |f(\Lambda, k)| \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3.39)$$

де $(r - r_i)$ – товщина прошарку, що береться розглядання, $E(\alpha, \beta)$, $F(\alpha, \beta)$ – еліптичні інтегральні функції 1^{го} і 2^{го} роду відповідно; $\alpha = \arcsin(\sqrt{2} \sin(\vartheta/2))$, $\beta = 1/\sqrt{2}$.

Такий підхід опирається на відповідні висловлювання щодо застосування математики [61, 63]. Розрахунки надають можливість побачити яким чином проходить розподіл речовини, що дифундує у товщу прошарку на відстань $\sim 1.1r_i$. Отримані результати гарно узгоджуються із розрахунками, що були проведені дослідниками раніше в [51, 52, 53, 66], а також із практичними

(експериментальними) дослідженнями при застосуванні умови "ж.к." [11, 112, 120].

Обчислення проводилися при використанні складеної оригінальної комп'ютерної програми із трансформацією у вигляд 3D накреслення для прошарку товщиною $(r-r_i)/r_i \leq 1,1$ над поверхнею твердого складника відповідно до рисунку 4.2. Графічна побудова (граничні умови "ж.к.") показана на рисунку 3.17. Напрямок OA на рисунку 4.2 співпадає із кутом, коли $\vartheta=0^0$.

З метою визначення дії зміни фізичних властивостей компонентів окресленої комірки в дисперсній системі провели подальше співставлення результатів розрахунків, в яких функціональна залежність $f(\Delta, k)|_{\text{м.к.}}$ (4.23) була визначена вже із урахуванням граничних умов "м.к." (4.17) [114, 138, 139, 141].

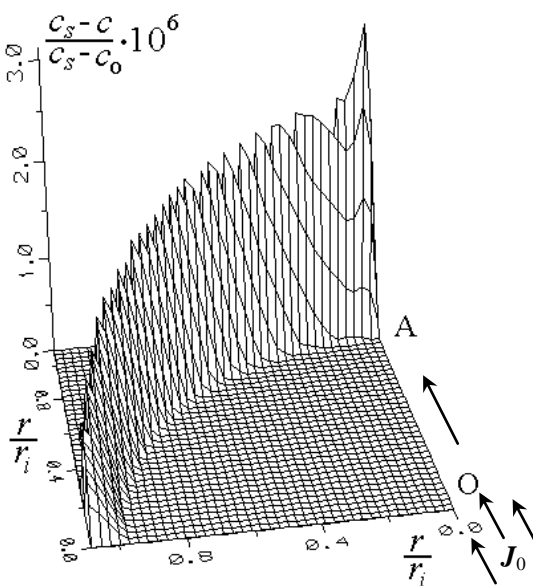


Рисунок 3.17 – Розподіл приведенної концентрації речовини для Cu-Sn

Обчислення проходило також при використанні складеної оригінальної комп'ютерної програми і подане у вигляді 3D накреслення та зображене на рисунку 3.18 для прошарку речовини із товщиною $(r-r_i)/r_i \leq 1,1$ над поверхнею

твердого складника, але вже для композиції Cu-Al при 727 °С (умови "м.к.") [114, 120, 141].

Характер розподілу дифузанта в обох випадках (рисунок 3.17, 3.18) є таким, що у напрямку OA , тобто коли $\vartheta=0^\circ$, числове значення приведеної концентрації $(c_s - c) / (c_s - c_0) \rightarrow \max$, а у напрямку, коли $\vartheta=90^\circ$, зменшується фактично до нуля. Для випадків, коли тверда частинка є більш електропровідною, є узгодження між граничними умовами "ж.к." на Рисунок 3.15 (Cu-Sn) та "м.к." на рисунку 3.18 (Cu-Al). По напрямку AO буде проводитися "підведення" ненасиченої речовиною, що дифундує із твердої поверхні в прошарок речовини, що розплавилася.

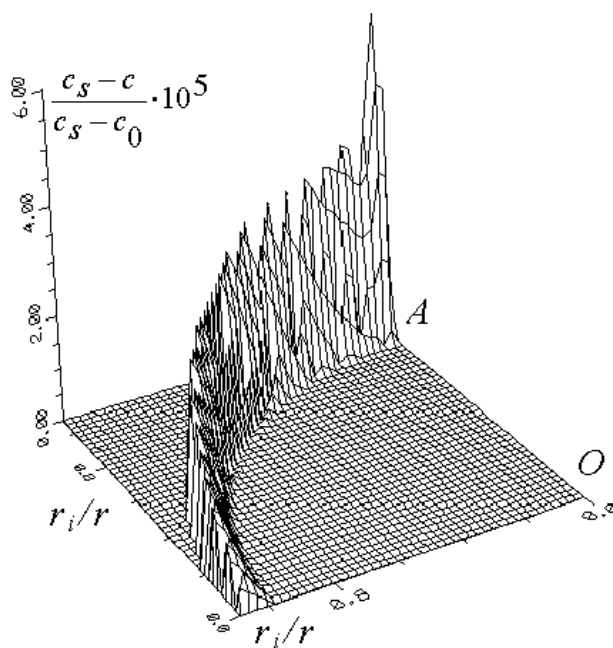


Рисунок 3.18 – Розподіл приведеної концентрації речовини (Cu-Al)

Для проведення співставлення результатів розрахунків із практичними дослідженнями було взято дві дисперсні композиції: мідь-алюміній (Cu-Al) та нікель-алюміній (Ni-Al) [120, 138, 139]. Мідь є більш електропровідним компонентом по відношенню до алюмінію, а нікель, навпаки, має меншу величину електропровідності, ніж алюміній. Фізичні характеристики

компонентів, що входять у склад комірки в дисперсному тілі та енергетичні умови дії на неї наведено в таблиці 3.6 [69, 70, 71, 146].

Такий механізм масопереміщення повинен збільшувати швидкість розчинення та дифузії речовини твердого тіла на межі переходу тверда поверхня – речовина, що розплавилася, по напрямку OA , коли $\vartheta=90^0$.

Опираючись на з рівняння для опису стаціонарної дифузії, яке має вигляд, як це відображено в [120] використаємо визначення про поведінку дифузанта біля самої поверхні твердого тіла для прошарку товщини $\leq 0,1r_i$. За для цього визначимо добуток $\partial x/\partial y$, який дозволить вивести формулу для градієнту концентрації по прошарку, як було початково визначено в [53, 61] та розкрито в [120, 138, 139]:

Таблиця 3.6 – Характеристики компонентів для співставлення

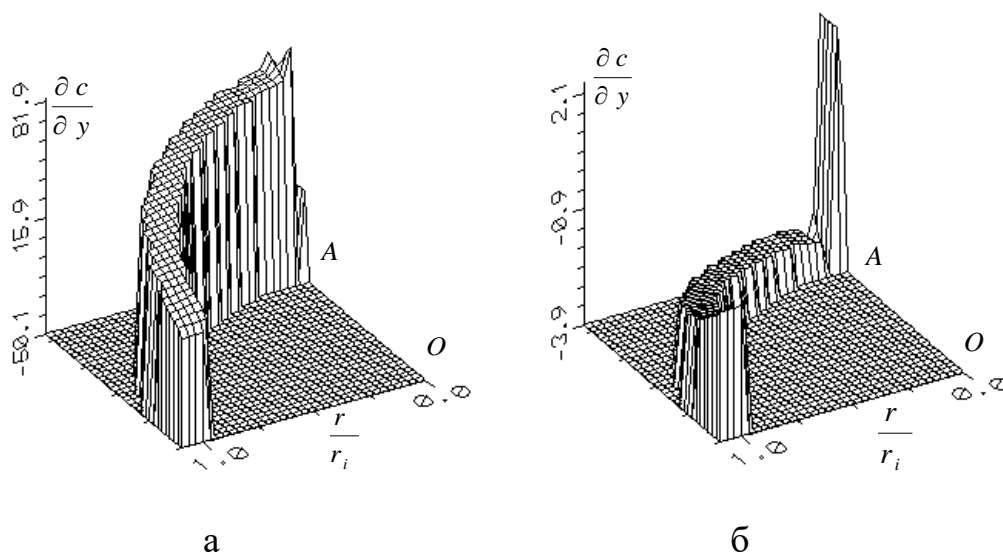
Параметр	Компоненти композицій		
	Cu _{ТВ}	Al	Ni
Електропровідність, λ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	23,4×10 ⁶	10,0×10 ⁶	2,3×10 ⁶
Динамічна в'язкість, η , МПа·с	-	1,076	-
	Композиція		
	Cu-Al	Ni-Al	
Концентрація речовини на поверхні тв. включ., c_s ,	0,31	0,0325	
Коефіцієнт стаціонарної дифузії D_0 , м ² /с	0,15×10 ⁻⁴	1,1×10 ⁻⁶	
Енергія активації, Q , кДж/моль	126,4	83,32	
Радіус твердої частинки, r_i , м, (мкм)	35×10 ⁻⁶ (35)		
Густина струму, J_0 , А/м ² , (А/см ²)	4,0×10 ⁶ (400)		
Температура, К, (°С)	1000 (727)		
Коефіцієнт комірки, k	2		

$$\left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{3(c_s - c_0)}{\Gamma(1/3)} e^{-\frac{4}{9}\zeta^3} \left. \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (3.40)$$

де

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = \left\{ \frac{5\mu J_0^2 r_i^4 \Lambda^3 |\varphi(\Lambda, k)| \sin^3 \vartheta \cos^{\frac{3}{2}} \vartheta}{2^6 \eta D [\sqrt{2}(2E - F) - \sin \vartheta \cos^{\frac{3}{2}} \vartheta]} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (3.41)$$

Концентраційне градієнтне поле, побудоване на основі масиву даних, що отримані за допомогою складеної комп'ютерної програми для прошарку $\leq 0,1r_i$, показано на рисунку 3.19 (умови "м.к.") [11, 120, 138, 139].



а – Cu-Al; б – Ni-Al

Рисунок 3.19 – 3D побудова поля концентраційного градієнту для прошарку $\leq 0,1r_i$

Деякі важливі параметри проміжних результатів обчислень на основі електропровідностей компонентів занесені до таблиці 3.7 [120, 138, 139].

З-за того, що розрахункова формула (3.40) опирається на попередню формулу для визначення поля концентрації, буде відповідна побудова картини. І ця побудова (рисунок 3.19) явно є узгодженою із попередніми графічними поданнями. Рисунок 3.19 вказує на пряму дію до зміни "полярності" в комірці, а

це, у свою чергу, призведе до зміни напрямку переміщень речовини по об'єму прошарку. Тобто зміни "полюсів" (розташування областей) із збільшенням ефекту дифузії.

Таблиця 3.7 – Величини проміжних параметрів

Параметр		Композиція	
		Cu-Al	Ni-Al
Λ		-0,85	0,88
$ \lambda_e - \lambda_i , \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$		$13,4 \times 10^6$	$7,7 \times 10^6$
$\partial c / \partial y$ (5.44)	макс.	83,83	-50,08
	мін.	2,36	-3,94

3.3. Визначення критерія Шервуда для оптимізації умов отримання амазвміщуючого матеріалу під дією електричного струму

Для визначення ступеня ефективності взаємодій між складниками порошкового тла і визначення процесу масоперенесення в системі поверхня твердого тіла \rightarrow середовище, що оточує, служить дифузійний критерій Нуссельта, що є критерієм Шервуда, який ураховує дію електричного струму [63]. Отримаємо в модифікованому вигляді формулювання, яке буде враховувати започаткування щодо накреслення комірки та граничних умов (3.30) чи (3.32).

Підстановка сталих для граничних умов (3.30) чи (3.32) (можна порівняти із теорією масоперенесення, що є застосована в моделі, де умова вирішення задачі – безмежжя простору [66]) дозволяють знайти повний дифузійний потік за механізмом електроконвекції із поверхні складника в глиб прошарку, що оточує тверду частинку. [11, 114, 120, 134, 138, 139, 141]:

$$Sh = 0,677 \cdot \left(\frac{r_i^4 J_0^2 \mu_0 \mu_e}{\eta D} \cdot |A^3 f(A, k)| \right)^{1/3}. \quad (3.42)$$

де $0,677 = \frac{0,919 \cdot 5^{1/3}}{2^{2/3} \Gamma(1/3)}$ як і в [56, 66].

Можна проаналізувати, яким чином величина перевищення процесу перенесення речовини на основі електроконвекції залежить від сили струму і температури, що утворюється від проходження струму. Використовуючи формулу (3.42), можливо за допомогою відповідно складеної комп'ютерної програми вирахувати величину числа (критерія) Шервуда для обраної двокомпонентної системи на основі Cu(12,5%)-Sn(87,5%) об'ємного вмісту.

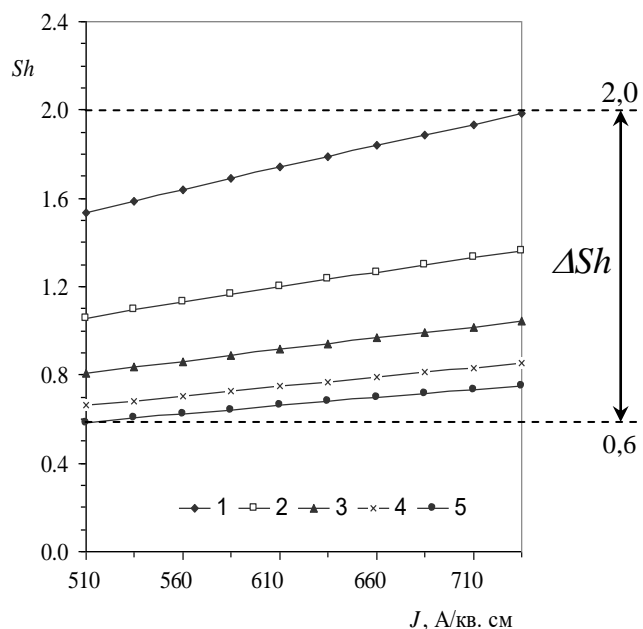
Як перший крок, рисунок 3.20 показує результати цих розрахунків для деяких дискретно обраних температурних рівнів відповідно до граничних умов "ж.к." [120].

Грунтуючись на формулюванні визначення (3.42), що є спорідненим із наведеним в [51] та використанням фізичних характеристик компонентів, що запозичені із наукових довідників [69, 70, 71, 72] для системи мідь – олово (Cu-Sn) розрахунки величини критерія Шервуда дають величину від 1 до 2,0 (таблиця 3.8) в температурному інтервалі від 510 °С (рисунок 3.20 крива №3) до 700 °С (рисунок 3.20 крива №5) відповідно до граничних умов "ж.к.".

На рисунку 3.20 ясно накреслено, що із пониженням температури лінія графічної залежності числа Шервуда, що є функцією від густини електричного струму, розташовується на більш високому рівні. Сам перехід від меншого рівня ефективності електроконвективної дифузії (коли допустимі значення $Sh < 1$) до більш ефективнішого рівня (при $Sh > 1$) повинен проходити вже при менших значеннях густини електричного струму J_0 ніж попередній [134].

Практичні експерименти, що були проведені по плану наукової роботи, показали, що перехід через значення, що дорівнює одиниці (при $Sh=1$), фактично відбувається за менших значень густини електричного струму (при $J_0 \leq 4 \times 10^{-6}$ А/м²), чим це витікає взагалі із розрахунків по рисунку 3.20 [134].

Практичні ж розрахунки показали, що величина критерія Шервуда може варіюватися фактично майже від нуля до троезначних цифр. Подібна "поведінка" потребує проведення додаткового аналізу і розрахунків, що вже виходить за рамки роботи [112].



1- 300 °С; 2- 405 °С; 3- 510 °С; 4- 615 °С; 5- 700 °С.

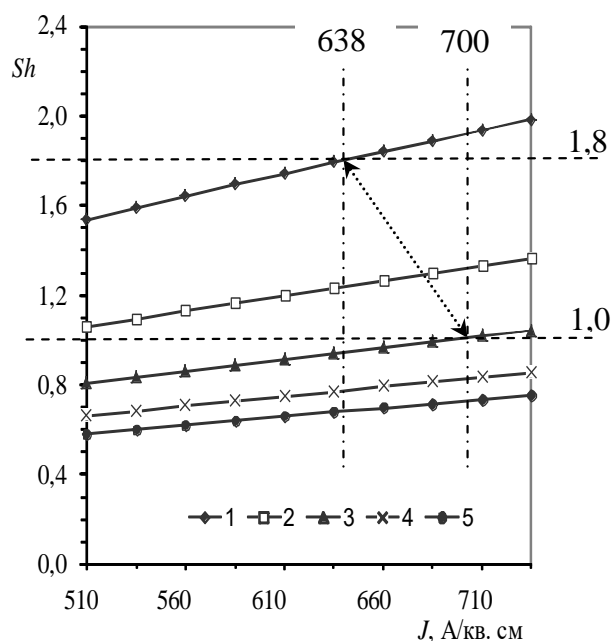
Рисунок 3.20 – Число Шервуда Sh , як функція густини струму J_0 (Cu-Sn)

Таблиця 3.8 – Значення критерія Шервуда для системи Cu-Sn

Порошкова композиція	Інтервал температури, К (°С)	Густина струму, А/м ² (А/см ²)	Величина критерія Шервуда
Cu-Sn (умови "ж.к.")	573-973 (300-700)	5,10-7,35×10 ⁶ (510-735)	~1-1,8

Аналізуючи рисунок 3.20, можна обмежувати чотирма лініями деякої площини – прямокутним периметром, в якому по діагоналі можна прослідкувати перехід величини критерія Шервуда від більшого значення до меншого при зростанні температури. На рисунку 3.21 показано результати, що окреслені периметром, після проведених розрахунків для деяких дискретних

температур в застосуванні до системи мідь – олово (Cu-Sn) (граничні умови "ж.к.") [112, 120]. Периметр із пунктирних ліній показує окреслену площину в кутах якої знаходяться подані числові величини критерія Шервуда 1 і 1,8 (умови "ж.к.") [112, 120].



1- 300 °С; 2- 405 °С; 3- 510 °С; 4- 615 °С; 5- 700 °С.

Рисунок 3.21 – Число Шервуда Sh як функція густини струму J_0

Можна також сказати, що перебільшення сили струму мало впливає на зміну величини числа Шервуда. Тобто є деяка практична оптимальна зона фізичних дій (чи то область, яка вміщує перехрестя сукупності дій на фізичний об'єкт), що знаходиться на перехресті параметрів комплексної дії: густина електричного струму в електропровідному середовищі \leftrightarrow величина температури. Причому рівень температури досягається завдяки ефекту Джоуля. При досягненні відповідного рівня нагрівання тіла - спочатку проходить плавлення тільки легкоплавкої компоненти.

Тут першопричиною є комплексна післядія електричного струму. Відхилення від зони дії "оптимальних параметрів" буде призводити тільки до

збільшення енергетичних втрат, без врахування інших ефектів, що можуть мати місце під час, наприклад, іншого температурного режиму.

Попередні розрахунки критерію Шервуда по формулі, наведеній у роботі [51], коли пропонована елементарна модель комірки вже має не чіткий окреслений периметр (для порівняння можна взяти до уваги формулу, подану, наприклад, в [112, 138, 139]), дають величину критерія Шервуда (Sh), яка є 1,8-1,0 (знижується) інтервалі температури від 300 до 400 °С і густині електричного струму $1,0-1,5 \times 10^6$ А/м² (100-150 А/см²).

Розбіжність критерія Шервуда від 1,0 до 1,8 при використанні формули (3.42) такі ж, як і в роботах [51, 134] (умови "ж.к."). В нашому випадку розрахунки велися для інтервалу температур 300-400 °С, але вже при використанні густини електричного струму від $1,0 \times 10^6$ до $1,5 \times 10^6$ А/м² (від 500 до 700 А/см²) відповідно до практичних значень під час консолідації шихти на основі мідь-олово (Cu-Sn) [113].

Використовуючи формулу для визначення критерія Шервуда, яка отримана попередньо (формула (3.42)) із урахуванням граничних умов "м.к." (3.32), можливо визначити в зміненому теоретичному поданні залежність згаданого критерія Шервуда від густини електричного струму по комірниці для деяких окремо взятих температур з точки зору застосування компонентів, що утворюють два кардинальні варіанти будови елементарної комірки за рахунок електропровідностей. Результати розрахунків при використанні похідних даних із таблиць 3.5 і 3.8 наведено на рисунку 3.22.

Графічна побудова функціональної залежності числа Шервуда на рисунку 3.22 вказує на те, як доля ефекту масовіддачі із поверхні твердого тіла по канонам дифузії електроконвективного типу буде максимальною при температурах, що близькі до температури плавлення компоненту, який стає оточуючим струмопровідним рідким середовищем. І не лінійно буде зменшуватися із підвищенням температури обробки.

Коли під час процесу консолідації порошкового тіла проходять внутрішні трансформації із компонентами системи, можливо взяти до уваги факт

одночасності проходження процесу переміщення межі (границі) між твердою складовою композиції і розплавленою.

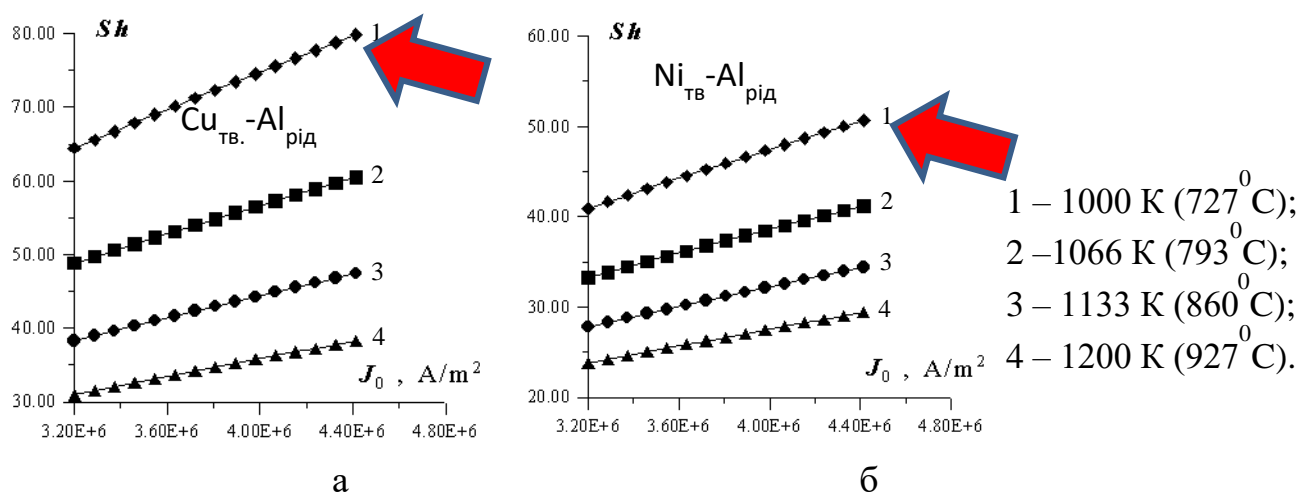


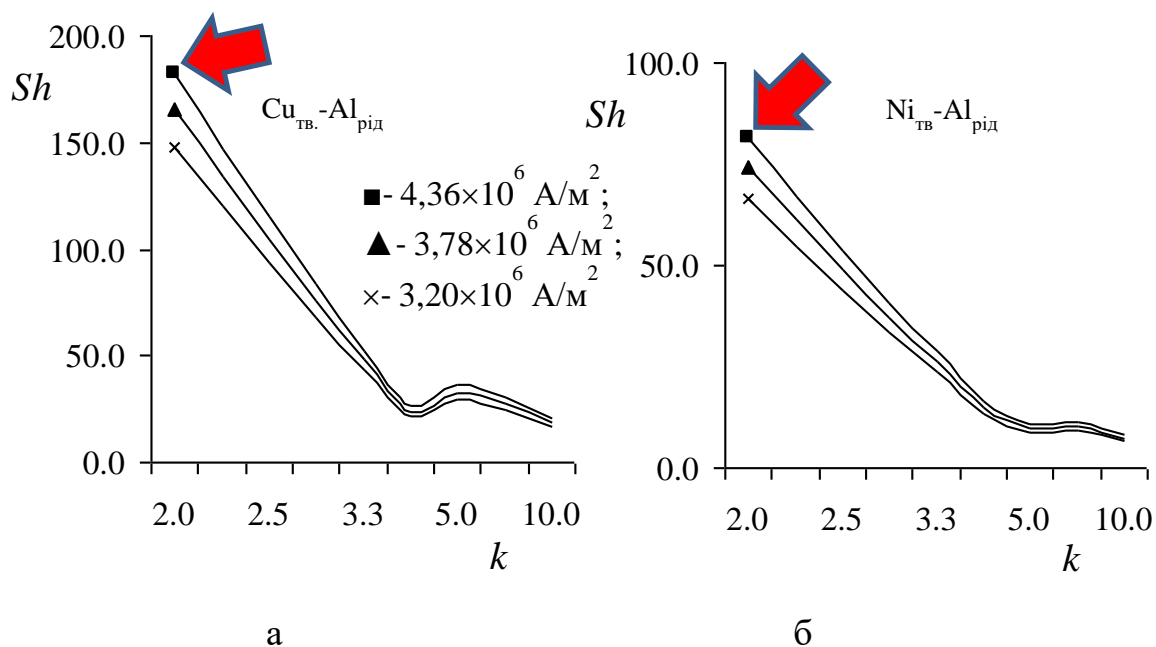
Рисунок 3.22 – Число Шервуда, як функція від густини струму J_0

Переміщення переходу можна застосувати на практиці. Тобто, сам об'єм твердого компонента, а значить і його радіус, буде зменшуватися, що автоматично призведе до зміни параметра комірки k для окремого їх угруповання. Щоб висвітлити ефект переміщення границі (переходу) між компонентами, що веде до перерозподілу простору в комірці, було розраховано залежність величини критерія Шервуда від зміни радіуса частинки, як параметра k . Рисунок 3.23 наводить результат розрахунків на основі формули (3.42) у вигляді графічної інтерпретації, що є прогнозом поведінки залежності величини критерія Шервуда від зміни величини коефіцієнта комірки під електрофізичними навантаженнями відповідно до умов "м.ч" (3.32) [11, 139].

Ефект збільшення коефіцієнта комірки k може мати місце на умовно визначеній, як першій стадії процесу консолідації порошкового матеріалу під дією електричного струму. На цьому початковому етапі проходить інтенсивне оплавлення поверхні порошкових частинок і сила механічного навантаження на пресовку може бути незначною.

Накреслення графічних ліній на рисунку 3.23 дозволяє прогнозувати, наприклад, ступінь взаємодій в дисперсній суміші, а також підтримувати

процес консолідації на необхідному рівні без збільшення величини електричного струму, змінюючи тільки параметр k , тобто відстань між твердими частинками (умови "м.к.") [120, 138, 139].



■ - $4,36 \times 10^6 \text{ A/m}^2$; ▲ - $3,78 \times 10^6 \text{ A/m}^2$; × - $3,20 \times 10^6 \text{ A/m}^2$;

а – композиція Cu-Al; б – композиція Ni-Al.

Рисунок 3.23 – Число Шервуда, як функція, що залежна від k

Обґрунтовані розрахунки щодо визначення основних параметрів і критеріїв процесів, які характеризують рівень взаємодій в системі в започаткуванні до комірки сферичного типу, виконувалися по визначеній відповідно до вирішення поставленої задачі алгоритмічній схемі (рисунок 3.24) [139]. Подане схемне накреслення може використовуватися для будь-якої композиційної двокомпонентної системи обумовленого типу [120].

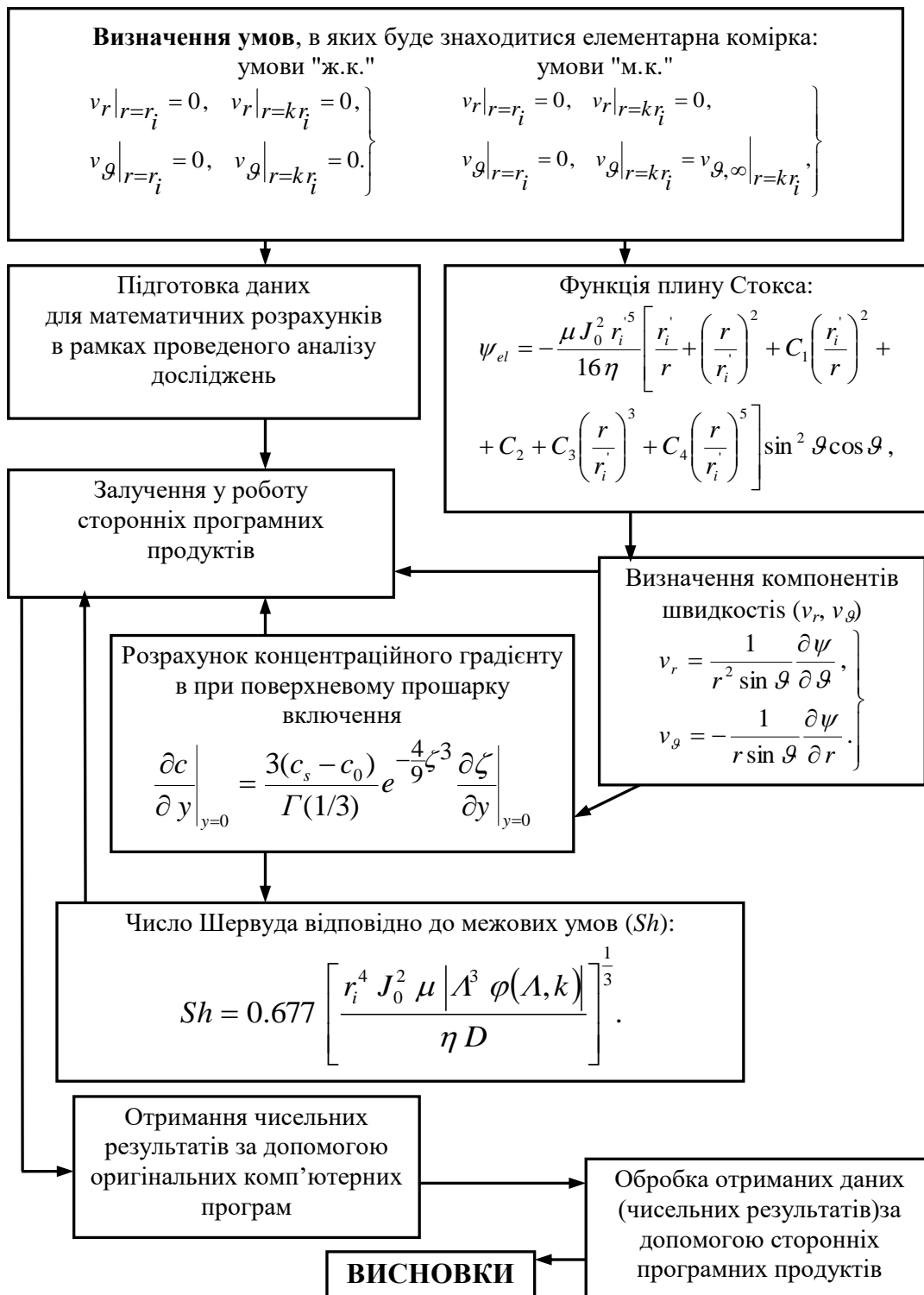


Рисунок 3.24 – Алгоритм проведення розрахунків для комірки сферичного типу

3.4. Висновки по розділу 3

Математичні розрахунки показують, що у разі, коли є відмінність електропровідності складників порошкової суміші та вони мають різну температуру плавлення, а це має місце практично завжди, буде ініціюватися направлене переміщення речовини і твердих порошкових частинок за рахунок дії виштовхувальної сили, яку називають квазіархімедовою силою електромагнітного походження.

Математичні розрахунки відповідно до представленої моделі комірки показують, що буде виникнення поле швидкості та концентрацій по розплавленому прошарку для порошкових тіл, що можуть вміщувати Cu-Sn, Cu-Al з різними коефіцієнтами комірки 2 і 4 за умов вирішення задачі. Показано однозначно, що розподіл поля швидкості не змінюється, а тільки масштабується відповідно до величини коефіцієнта комірки.

Розрахований за результатами практичних досліджень для систем, що можуть вміщувати Cu-Sn, Cu-Al та Ni-Al критерій Шервуда становить від 148 до 462 в залежності від умов електрообробки. Проведені розрахунки показують на зниження температури процесу консолідації під дією спрямленого постійного струму на 300-400 °C та зменшення часу тривалості електрообробки до 3 хв для, наприклад, алмаз-металевих композицій інструментального призначення.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ АЛМАЗ-МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМ, ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

У розділі при використанні моделі поведінки порошкового тіла та на прикладі елементарної комірки, що знаходяться під дією постійного електричного струму проведено визначення особливостей формування структури 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.

Вивчено особливості формування структури металевих систем між компонентами композиції Cu-Al та Ni-Al при переміщенні твердих частинок, які є складовими в матеріалах інструментального призначення при отриманні їх під дією спрямованого постійного струму

4.1 Інтенсифікація взаємодії між складниками металевої зв'язки під дією електричного струму

Експерименти обумовлювали визначення швидкості формування структури зразків чи виробів на основі дисперсних композицій. В якості твердих сферичних компонент було взято порошок міді, а в якості матриці, що плавиться і утворює прошарок між твердими компонентами – олово [11, 113, 120, 140, 149, 150, 151]. Тобто за основу була обрана порошкова суміш Cu-Sn.

З метою обґрунтування ефекту від проходження електричного струму крізь порошкову пресовку проводилося два види досліджень із задіянням наявного устаткування:

- з проходженням електричного струму (рисунок 3.18 а)
- без проходження (рисунок 3.18 б).

Використання подібних технологічних відмінностей показало відповідні результати [113, 120, 140]. Температура обробки в обох випадках була майже однаковою.

В першому випадку використали дослідницьке обладнання ЕРАН 2/1 [100], в другому – звичайну муфельну піч.

Для досліджень було використано сфероподібний порошок міді (Cu) дисперсністю 50-55 мкм із загальною концентрацією в суміші 20% по масі міді в засипці [91]. В якості матриці, що плавиться, а потім твердіє, використали порошок олова (Sn) [92]. Термообробку об'єкта під дією електричного струму проводили при 330-400 °С, коли олово повинно вже розплавитися (таблиця 4.1). [113, 148].

З метою досягнення прийняттого рівня узгодження розрахунків із практикою коефіцієнт комірки був обраним у ньому $k \sim 2$.

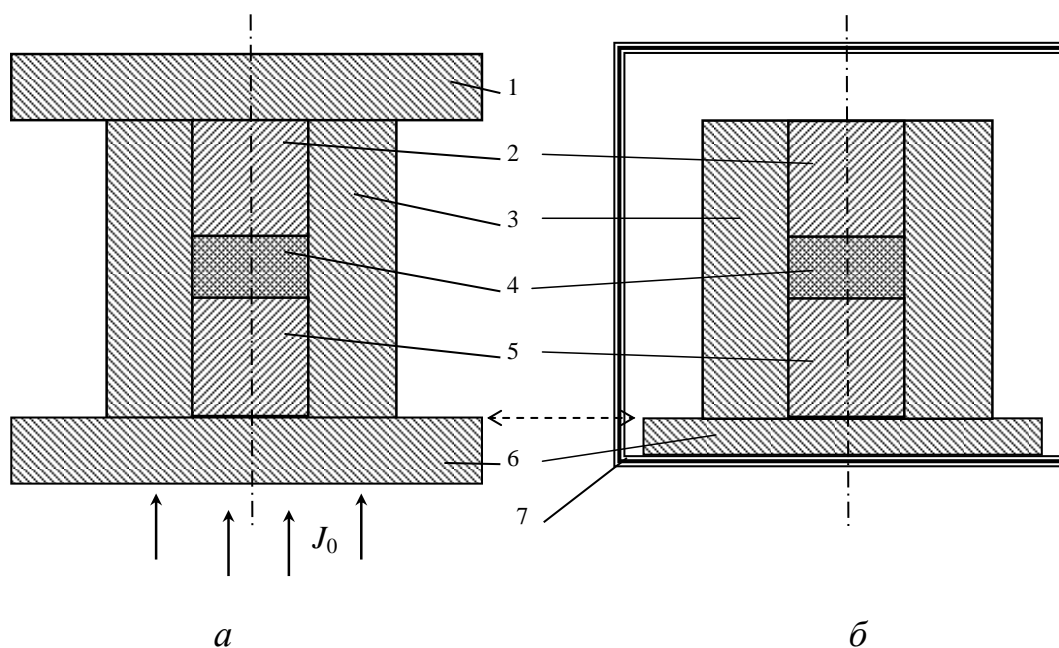
Таблиця 4.1 – Сплавоутворення в металевій зв'язці

Рисунок	Режим обробки:	Діаметр Cu частинок, мкм	Густина струму, А/м ²	Температура, °С	Тривалість дії, с	Розмір структурних елементів, мкм	
						Ширина	Довжина
4.1a	Із проходженням електричного струму	50-55 (масова доля 20 %)	1.0- 1.5×10 ⁶	330-400	~120	Sn + Cu ₆ Sn ₅ і Cu ₃ Sn	
						0,5-1,0 (Cu ₆ Sn ₅)	до 20
4.1б	В муфельній печі	---	---	~350	~1200 (20 хв)	Cu + Sn + Cu ₆ Sn ₅ і Cu ₃ Sn	
						Cu із оторочкою Cu ₆ Sn ₅ та Cu ₃ Sn	

Тривалість дії електричного струму на порошкову засипку була приблизно ~ 120 с (~ 2 хв) із середньою густиною $1,0-1,5 \times 10^6$ А/м² ($100-150$ А/см²) (рисунок 4.1а) і механічному підпресовуванні у 30-40 МПа, що розраховувалося, опираючись на закони Кірхгофа (таблиця 4.1) [19].

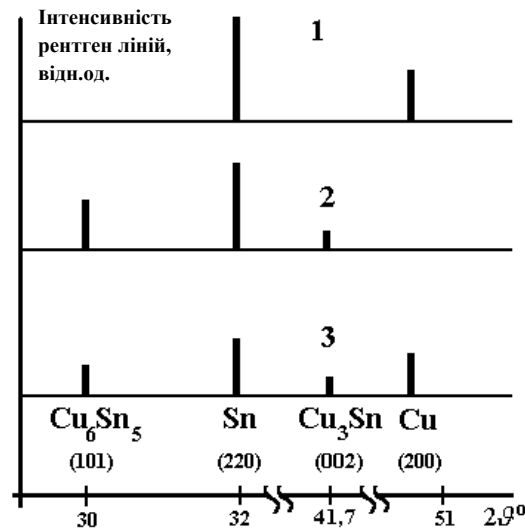
В муфельній печі термічна обробка пресовки, яку отримали при пресуванні при 30-40 МПа на устаткуванні ЕРАН 2/1, проводилася при ~ 350 °С. Але сама тривалість спікання в печі була значно довша, що загалом склало близько ~ 1200 с (~ 20 хв) (рисунок 4.1б) (таблиця 4.1) [11, 113, 120, 140, 148].

Про внутрішній стан зразків, отриманих після тієї чи іншої термічної обробки можна було судити на основі проведеного рентгеноструктурного аналізу. Було проведено рентгенофазовий аналіз двох різних партій зразків та суміші первинних порошоків у формі "сирих" пресовок (рисунок 4.2) [120, 140].



1 – верхня і 6 – нижня прокладка з графіту; 2 – верхній і 5 – нижній пуансон-електроди; 3 – матриця; 4 – пресовка; 7 – муфельна піч;
 а – із проходженням струму; б – у муфельній печі.

Рисунок 4.1 – Схема проведення експериментів порівняння



1 – початковий стан; 2 – після проходження струму; 3 – після муфельної печі.

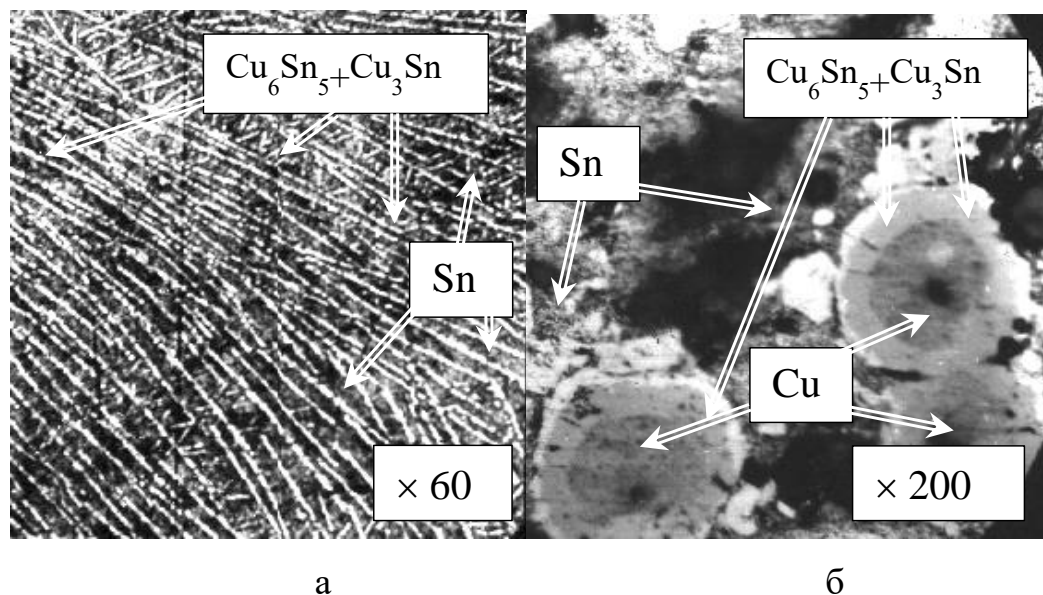
Рисунок 4.2 – Штрих рентгенограми (схемне зображення) для зразків на основі мідь-олово (Cu-Sn)

Виявилось, що обробка, де застосували дію електричного струму, забезпечує набагато інтенсивніший ступінь взаємодій, ніж коли була проведена звичайна термічна обробка в муфельній печі [140]. Проходження електричного струму достатньо сильно впливає на швидкість взаємодій між компонентами. Достатньо наочно даний факт підтверджується і проведеними рентгеноструктурними і металографічними дослідженнями, на що вказують отримані мікрофотографії структури зразків (рисунок 4.3) [11].

У випадку проходження електричного струму в отриманих зразках присутніми є інтерметаліди Cu_6Sn_5 і Cu_3Sn (рисунок 3.25а), а міді (Cu) в чистому вигляді вже нема. Утворюється змішаний фазовий склад: олово (Sn) + багато інтерметаліду складу Cu_6Sn_5 і трохи Cu_3Sn .

У випадку обробки в печі (рисунок 4.2б) спостерігається більш широко сформований фазовий склад зразків. Внутрішня структура зразків складалася із залишків міді (Cu), олова (Sn) і інтерметалідів складу Cu_6Sn_5 і Cu_3Sn [11, 113, 140, 148].

У випадку пропускання струму (рисунок 4.2) наявний інтерметалід складу Cu_6Sn_5 (рисунок 4.3а) (таблиця 4.1) має пластинчасту форму з шириною 0,5-1,0 мкм і до 20 мкм загальної довжини (рисунок 3.21а). А такі структурні елементи відсутні в структурі зразків при обробці в печі, що і подано на рисунку 4.2 (таблиця 4.1). Фактом, що говорить про не зовсім повне проходження процесів сплавоутворення є наявність залишкової кількості міді (Cu) у чистому вигляді. Збереглася серцевина сферичної частинки. Але вона вже меншого розміру і має навколо себе оторочку із інтерметалідів Cu_6Sn_5 та Cu_3Sn (рисунок 4.3б) [113, 120, 148].



а – отриманих методом під дією струму,

б – отриманих традиційним спікання без тиску в муфельній печі.

Рисунок 4.3 – Мікроструктури зразків на основі мідь-олово (Cu-Sn)

Даний факт вказує на значно менший ступінь внутрішніх взаємодій при обробці в муфельній печі [113, 148]. Це надає можливість висловитися, що завдяки дії електричного струму крім електротермії з'явився і додатковий "рушійний важіль" щодо прискорення процесів масопереміщення. Цей "важіль" і збільшив ступінь масообмінних процесів між поверхнею твердого тіла і приповерхневого прошарку, як струмопровідного середовища, що оточує.

Опираючись на попередні науково-практичні дослідження, можна зробити висновок, що додатковим "важелем прискорення" фізико-хімічних процесів в дисперсному тілі було ініційоване дією електричного струму явище масоперенесення на основі електроконвекції. Це заключення всебічно обґрунтовано у надрукованих джерелах [26, 42, 51, 52, 66, 113, 120, 121, 152].

Це дозволяє зробити наступний висновок – під дією електричного струму в дисперсному (порошкового складу) тілі мало місце більш інтенсивніше проходження процесів переміщення речовини. Таке сприяло загальному збільшенню ступеня взаємодії поверхні твердої частинки із речовиною прошарку (оточенням). Співставлення рентгенофазового і металографічного досліджень і часових інтервалів тривалості обробки під дією електричного струму, що складала близько 120-180 с (~2-2,5 хв) та обробки в муфельній печі, що складала вже ~1200 с (~20 хв), дозволяє затвердити відповідний висновок.

Виходячи із факту тривалості обробки порошкового матеріалу, можна зробити висновок, що прискорення взаємодій ґрунтується на принципах масоперенесення електроконвективного походження, який більш ніж на порядок перевершує явище масоперенесення за механізмом тільки атомної дифузії [113, 140, 148].

Аналогічний результат було отримано і під час проведення досліджень при використанні мідних частинок (порошок сферичної форми) із дисперсністю близько ~700 мкм (~0,7 мм).

Загальна масова доля міді (Cu) тепер складала 80 % в композиції, решту складало олово (Sn) – 20 %. Температура впродовж обробки під дією електричного струму сягала 600-670 °С. Тривалість процесу обробки була ~120 с, що має відповідність із таблицями 4.1, 4.2.

Дослідження структури і фазового складу одержаних зразків встановило, що в структурі є присутніми чисте олово (Sn) + інтерметаліди складу Cu_6Sn_5 і Cu_3Sn . Інтерметаліди мали вигляд пластинок шириною 0,7-5,0 мкм та довжиною до 100 мкм (0,1 мм). Мідь (Cu) у чистому вигляді була відсутня.

З метою порівняння була також досліджена структура і фазовий склад вищевказаної суміші мідь-олово (Cu-Sn). Термічну обробку в муфельній печі провели при вищих температурних режимах, що обумовлені в таблиці 4.2.

Підхід показав, що процес повного завершення взаємодій проходить при температурі 650-700 °С. Але тривалість витримки при такій дисперсності мідного порошку повинна складати вже близько ~2400-3600 с (40-60 хв), щоб забезпечувати формування кінцевого фазового складу, як на рисунок 4.3а. Розмір інтерметалідів при такій тривалості обробки склав 5-25 мкм шириною та 1600-7000 мкм (1,6-7,0 мм) за довжиною при діаметрові отриманого зразка в 15 мм (таблиця 4.2) [113, 140, 148].

Таблиця 4.2 – Сплавоутворення в системі Cu-Sn при використанні крупного мідного порошку

Рисунок	Режим обробки:	Діаметр Cu частинок, мкм	Густина струму, А/м ²	Температура, °С	Тривалість обробки, с	Розмір структурних елементів, мкм (суміш інтерметалідів Cu ₆ Sn ₅ і Cu ₃ Sn)	
						Ширина	Довжина
3.18а	Із проходженням електричного струму	700 (масова доля 80 %)	1.0-1.5×10 ⁶	600-670	~120	0,7-5,0	до 100
3.18б	В муфельній печі		---	650-700	2400-3600 (40-60 хв), склад, схожий із рисунком 3.21а	5-25	1600-7000

Дослідження, коли порошкова пресовка піддавалася термічній обробці під дією електричного струму протягом малої тривалості часу, тобто 15-20 с, дозволило встановити яким чином здійснюється прискорення взаємодія між компонентами (рисунок 4.4) [113, 140, 148].

На рисунку 4.4 показано що, навколо мідної частинки спостерігається тонкий шар інтерметаліду складу Cu₆Sn₅ і пластинки того ж інтерметаліду,

котрі спрямовані в різні і на зовнішні боки. Можна припустити, що завдяки дії на компоненти структури явищ електромагнітної природи, які виникають від проходження електричного струму крізь пресовку (це особливо стосується об'ємних областей де є лінії різкої зміни електропровідності), деякої довжини частина інтерметаліду складу Cu_6Sn_5 відривається (фактично відламується) від поверхні і зноситься у радіальному напрямку [11, 64, 66, 112, 113, 120, 124, 148].

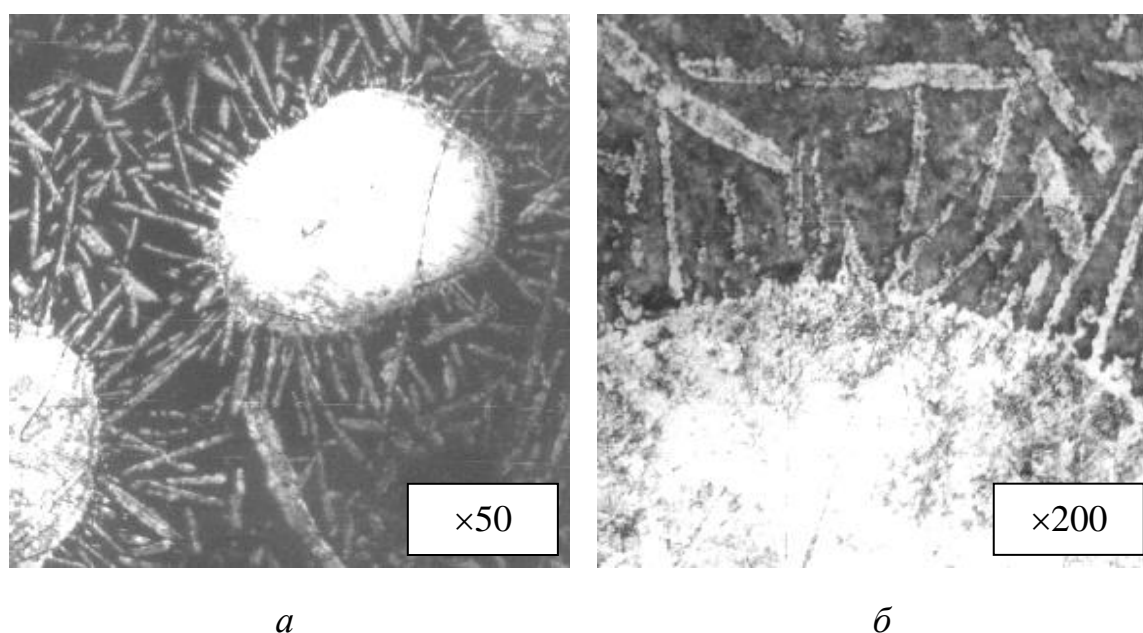


Рисунок 4.4 – Мікроструктура зразків композиції мідь-олово (Cu-Sn), після 15 с дії електричного струму

Завдяки дії електричного струму і ініціації додаткового процесу такого, як реакційна дифузія, в цілому, полегшується доступ олова до міді і тим самим прискорюється ступінь взаємодії та масопереміщення. У результаті різниця у структурі зразків, що отримані за традиційною технологією і під дією електричного струму повинна взагалі забезпечити різні рівні фізичних і механічних і технологічних властивостей матеріалів чи виробів [120].

4.2. Переміщення твердих частинок металеві зв'язки під дією сил електричної природи

Щоб спостерігати за рухом твердих частинок, що входять до складу металеві зв'язки, крізь засипку цілеспрямовано пропускали електричний струм в ході експериментів [123, 124, 130]. В основі практичних досліджень для отримання прошарку використовувався порошок олова марки ПО-1 [92]. Твердими компонентами служили частинки двох сортів (таблиця 4.3) [123]:

- електропровідні гранули жароміцного сплаву на основі нікелю дисперсністю 300-500 мкм із складом (%мас.): 4,1 Мо, 5,3 W, 10,9 Cr, решта – Ni (за результатами хімічного аналізу);

- непровідний порошок корунду дисперсністю 63-500 мкм (оксид алюмінію Al_2O_3) [94].

Оскільки сам нікелевий сплав і корунд має меншу електропровідність, ніж їх речовина, що розплавилася - олово, то в даному випадку сила, що вираховується по (3.8), буде виявляти виштовхувальну дію на порошкові частинки обох типів.

Порошок олова і вказані домішки, вміст яких складав 15% по масі згідно таблиці 4.3, ретельно перемішували, що забезпечувало отримання однорідних сумішей [108, 109].

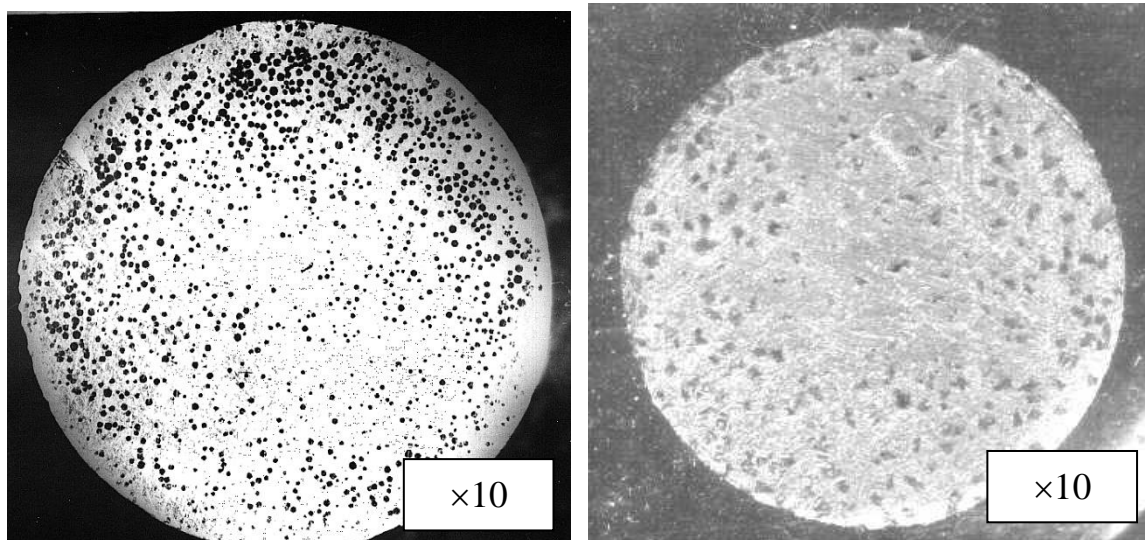
Через пресовку, що знаходяться в порожнині прес-форми, пропускали постійний електричний струм [122]. У усіх експериментах електричний струм проходив у вертикальному напрямку.

На початку експерименту зразки мали порошкові частинки, рівномірно розподілені по усьому об'єму суміші. Після дії електричного струму на комплексну систему протягом деякого часу просторовий розподіл порошкових частинок сильно змінювався. Концентрація частинок обох типів біля зовнішньої бічної поверхні зразків виявилася значно вищою, ніж в центральній її частині (рисунок 4.5) [122, 123].

Таблиця 4.3. Технологічні параметри електрообробки композитів

Склад засипки	Матриця, що плавиться	Розмір частинок, мкм	Розмір зразка, мм		Струм, А	Тривалість обробки, с (розрахунок)
			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 ₂ O ₃	Sn	63-500	13-15	6-7	600-650	180-240 (60)

Крім того виявилось що, концентрація частинок у верхній частині зразка у 1,6 разів перевищує кількість частинок, ніж в нижній її частині [122, 123, 124].



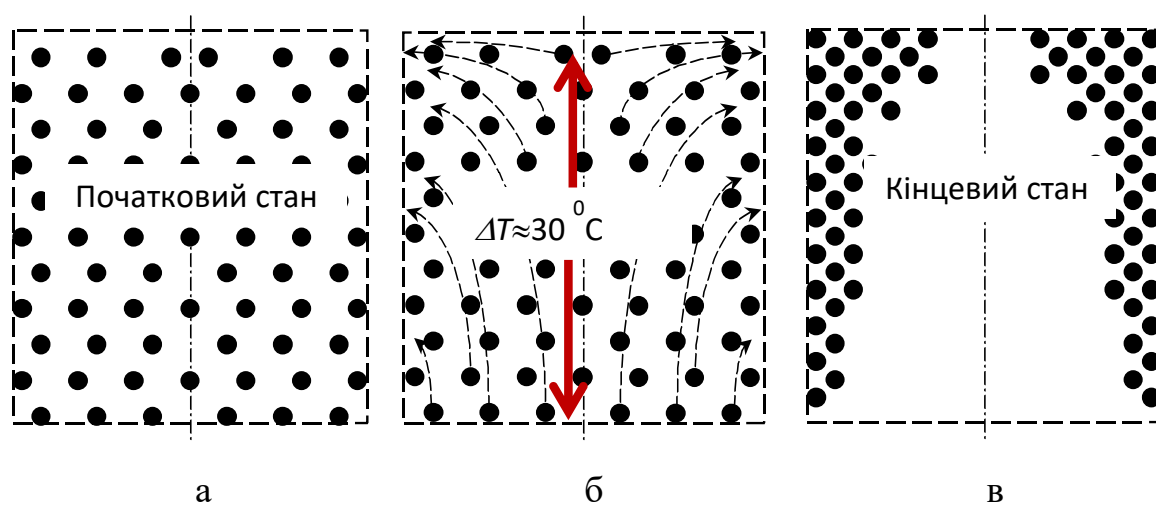
а

б

а – Sn + тверді частинки жаростійкого сплаву на основі Ni; б – Sn + частинки електрокорунду.

Рисунок 4.5 – Розподіл твердих частинок в зразках

Як було обумовлено, під дією електродинамічних явищ і сил електромагнітного виштовхування, що виникають від проходження електричного струму крізь дисперсію, відбувався перерозподіл частинок в об'ємах зразків. Аналіз динаміки 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 (рисунок 4.6).



а – початковий стан; б – квазісуспензія, що знаходиться під електро-термічним навантаженням; с – кінцевий розподіл частинок.

Рисунок 4.6 – Схематичне зображення перерозподілу твердих частинок

За формулами, із використанням даних по фізичних величинах [69], отримані значення швидкості переміщення для частинок, які знаходяться у врівноваженому стані, в радіальному напрямку та мають порядок $\sim 10^{-5}$ - 10^{-4} м/с (рисунок 4.7).

Проведені розрахунки добре узгоджуються із реальними результатами і дозволяють його використовувати для попередніх оцінок перерозподілу твердих частинок різної природи в рідких електропровідних середовищах під дією сил електричної природи (таблиця 4.4) [121, 122, 123, 124, 130].

Отриманий порядок швидкості пересування дозволяє частинкам нікелевого сплаву, що знаходяться біля центральної осі контейнера, досягати зовнішньої бічної поверхні за 300 с, а частинкам корунду за 60 с (рисунок 4.5).

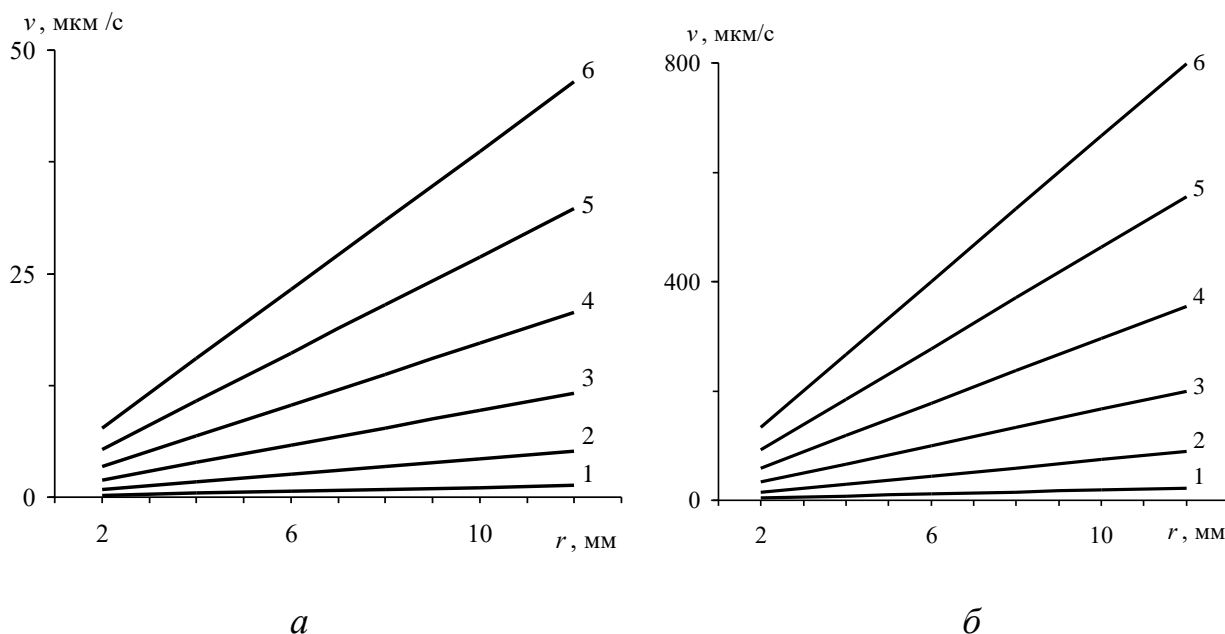
Таблиця 4.4 – Швидкість переміщення твердих частинок в радіальному напрямку для діаметра зразка 20 мм

Засипка	Радіальна швидкість пересування твердих частинок, м/с	
	Розрахунок	На основі експериментів
Олово – частинки із нікелевого сплаву	$1,2-40 \times 10^{-5}$	$\sim 1,6 \times 10^{-5}$
Олово – частинки корунду	$20-580 \times 10^{-5}$	$\sim 8,3 \times 10^{-5}$

Значне відхилення для системи олово – частинки корунду (таблиця 4.4) пов'язане із умовами спрощення проведення розрахунків при постановці вирішення задачі і фактичною не електропровідністю частинок ($\lambda_i \cong 0$).

Початок вертикального руху на практиці можна пояснити безпороговим механізмом початку конвекції на відміну від класичного подання конвекції Бенара-Релея [132]. Можна сказати, що до ефекту початку зрушення з місця твердих порошкових частинок вносить свій вклад і сила електромагнітного виштовхування (квазіархімедова сила) (рисунок 3.2), яка спрямована перпендикулярно осі зразка.

Також за результатами спостережень можливо запропонувати гіпотезу, що тут виникає конвекція, під дією комплексу електротермічного навантаження, що призводить до переміщування частинок у вертикальному напрямі [124, 130].



а – сплав на основі нікелю ; *б* – корунд.

Рисунок 4.7 – Розрахована швидкість переміщення твердих частинок різної дисперсності $d= 50$ (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5), 300 (6) μm при віддаленні їх від центральної осі

Розрахунки за формулою (3.16) [132, 133] з використанням [69] для квазісуспензії, що складається із розплавленого Sn + частинки електрокорунду дають критерій $Ra \cong 79$.

Виштовхування до зовнішньої поверхні твердих частинок, що є менш електропровідні, чим розплавлене олово, пояснюється дією квазіархімедової сили електромагнітного походження. Коли йде мова про квазісуспензію де вже є достатня кількість розплавленого олова, тоді тверді частинки (таблиця 4.3) починають випробовувати дію сили, спрямованої вертикально [124]. При цьому пояснення перерозподілу концентрації врівноважених частинок по висоті очевидне. У разі ж використання частинок нікелевого сплаву, тобто при $\rho_i > \rho_e$, сила спрямована до низу, а у разі використання частинок корунду, тобто при $\rho_i < \rho_e$, сила спрямована (направлена) до гори. Не зважаючи на таке, концентрація частинок обох типів виявляється більшою в верхній частині

зразка. Це можна пояснити тим, що дія сили на основі електродинаміки призводить до переміщення частинок по вертикалі, бо переважає силу тяжіння.

Статистичні дані з експериментів також показують, що в середовищі з градієнтом температури рухаються не лише окремі тверді частинки, але і агломерати твердих частинок [22].

Аналіз фізичних зміщень в дисперсному тілі, котре складається з розплавленого олова і твердих частинок із жаростійкого сплаву на основі нікелю (Ni–Cr–Mo–W) чи корунду (Al_2O_3) вказав на неординарність динаміки твердих частинок.

Показано, що проходження електричного струму призводить до перерозподілу концентрації твердих частинок [121, 122, 123, 124, 130]. Визначено наявний неоднорідний розподіл різних типів твердих частинок по об'єму отриманих зразків. Їх концентрація збільшилася у верхній частині зразка і у радіальному напрямку до бічної поверхні.

Причина процесу перерозподілу – ініціація руху завдяки комплексній дії квазіархімедової сили електромагнітного походження, сили тяжіння, класичній силі Архімеда, конвекції термічногравітаційного походження [122, 123, 132].

Існування радіальної компоненти виштовхувальної сили в рівнянні (3.8), що діє в горизонтальній площині на тверду порошкову частинку, яка, у свою чергу, діє на прошарок, що оточує, змінює ситуацію з гідродинамічної точки зору в принципі [122]. Саме стан дисперсного тіла, що вже є фактично квазісуспензія, в нашому випадку випробовує сили, які є векторними сумами осьових (вертикальних) і радіальних (горизонтальних) компонент. Тому для повного аналізу критеріїв формулювання (3.16) є неприйнятним, бо наше подання для розглядання – якісно інше, ніж для опису за випадком Бенара-Релея [124].

Запропонований математичний підхід явища можна застосовувати для отримання деталей із змінним чи градієнтним складом або продуктів взаємодії (для нерозчинних, мало- або повністю розчинних складників) при отриманні

об'єктів (напівфабрикатів, деталей) з градієнтними магнітними, електро-, теплопровідністю і механічними властивостями в тілі виробу [123, 130, 153].

4.3. Ініціація взаємодії між твердою поверхнею порошкової частинки і розплавленою компонентою під дією електричного струму

Коли, наприклад, отримують гетерогенні композиційні матеріали, які в своєму складі зазвичай містять більш легкоплавкі компоненти в чистому вигляді (або їх сплави в якості просочуючого компоненту чи матриці, що твердіє) застосовують технологічні прийоми щоб засипка витримувалася при температурі між точками плавлення компонентів.

Так в процесі застосування обраного режиму термічної обробки, майже завжди, складаються деякі технологічного змісту умови, що перешкоджають повнішому протіканню фізико-хімічних взаємодій на границях фізичних переходів між компонентами.

За необхідністю збільшення ступеня процесів взаємодій вводять добавки для збільшення ефекту змочування в системі, збільшують температуру обробки, а також застосовують всякого роду зовнішні силові дії фізичної природи на систему в цілому. Але ряд подібних дій буває не завжди бажаним, оскільки це може позначитися на погіршенні експлуатаційних властивостей виробу [113, 148].

Практично показано, що для прискорення внутрішніх взаємодій під час консолідації достатньо почати пропускати електричний струм крізь пресовку, як показує практика [140, 154, 155, 156, 157, 158]. Під дією електричного струму в об'ємі комірки виникає направлене переміщення речовини в прошарку, який контактує із твердою поверхнею.

Візьмемо до уваги випадок, пов'язаний звісно ж із практикою. Тобто, коли в якості твердих компонент комірки слугують сферичної форми порошкові частинки міді (Cu) діаметром 50-55 мкм, а в ролі електропровідного прошарку – розплавлене олово (Sn), що вже не має дисперсного стану. Також

будемо опиратися на відповідність щодо технологічних параметрів, відображених в таблиці 4.5 [138, 139].

Таблиця 4.5 – Властивості складників для визначення рівня переміщень

Склад	Компонента	Темпер. коэф. опору.	Питома. провідність	Питома теплоємність	Густина речовини	Тепло-провідність	Температуро-провідність	Динамічна в'язкість	Швидкість переміщення речовини
		1/К	1/(Ом м)	Дж/(кг К)	кг/(м ³)	Вт/(м К)	м ² /сек	кг/(м с)	м/с
		α	λ	χ	ρ	κ	α	η	ν
Cu–Sn (350-400 °С) (таблиця 3.5)	Cu	$3,68 \times 10^{-3}$	$2,85 \times 10^6$	$4,15 \times 10^2$	8930	373	$1,01 \times 10^{-4}$	тверд.	---
	Sn	$5,56 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^6$	$2,57 \times 10^2$	6912	33,8	$1,90 \times 10^{-5}$	$1,54 \times 10^{-3}$	$3-3,5 \times 10^{-6}$

Одним із параметрів прискорення внутрішніх взаємодій під дією електричного струму після початку процесу оплавлення є швидкість переміщення речовини при набутті достатньої динамічної в'язкості (таблиця 4.5) речовини навколоповерхневого прошарку більш тугоплавкої компоненти. Задіяння формул для визначення переміщення речовини по навколоповерхневому прошарку із [42, 114] за ідеалізованих умов вирішення задачі може сягати до $3-3,5 \times 10^{-6}$ м/с (3-3,5 мкм/с) [113, 140, 148].

При визначеній величині швидкості переміщення речовини (таблиця 4.5) вона може досить швидко "відтягувати" утворений фазовий склад, від твердої поверхні назовні. Це, у свою чергу, обов'язково позначиться на часі повних взаємодій в дисперсному тілі [113, 148].

Іншим параметром, що також може описати ступінь дії електричного струму по рівню перевищення дифузійного потоку з поверхні твердого тіла є безрозмірна величина – критерій Шервуда Sh [38, 39, 60, 61]. Попередні розрахунки величини критерія Шервуда, що визначається, як відношення інтегральної величини всіх дифузійних процесів (електроконвективної дифузії в тому числі) до атомної, по формулі, яка наведена в [51, 112, 134, 138]. Розрахунки визначають величину Sh в широкому інтервалі, як значень

електричного струму, так і для рівнів температури, яка є наслідком від проходження електричного струму (таблиця 4.6) [113, 120, 140, 148].

Таблиця 4.6 – Величина критерія Шервуда від зміни технологічних параметрів

Порошкова система	Густина струму, A/m^2 (A/cm^2)	Температурний інтервал, $^{\circ}C$	Розрахована величина критерія Шервуда, Sh
Cu–Sn	1,0-1,5 $\times 10^6$ (100-150)	300-350	1,0-1,8
	5,0-7,0 $\times 10^6$ (500-700)	350-400	1,6-1,8

З таблиці 4.6 видно, що збільшення критерія Шервуда до 50-60% більше залежить від збільшення густини струму (~3-4 рази) ніж від збільшення температури (8.6%).

На практиці величина числа Шервуда може сягати набагато більших величин, що дозволяє судити про вагомий вклад електродії на фізико-хімічні процеси. Це ймовірно є результатом того, що подання моделі, представлене в роботах [51, 66, 112, 134] не враховує активуючу дію інших внутрішніх взаємних процесів, наприклад реакційної дифузії, а також специфічних умов проведення технологічних робіт [113, 140, 148].

Для порівняння результатів при використанні результатів обчислення були проведені експерименти відповідної чинності, які торкалися вивчення процесів взаємодії в дисперсному тілі між компонентами під дією електричного струму. В якості композиції "тверде – струмопровідний прошарок, що оточує" були взяті дві композиції металів Cu-Al та Ni-Al, що є складовими зв'язок інструментального призначення відповідно до таблиці 2.2. В такому випадку є практично взаємна зміна рівня електропровідностей між складниками в комірці. Як було сказано, проходить зміна "полюсів" в комірці. Всі

експериментальні роботи виконувалися на дослідницько-експериментальному устаткуванні ЕРАН 2/ [100].

Відповідно до вирішення поставленої задачі використали спочатку композицію, що складалася із 30%Cu-70%Al (мас.). Процес консолідації під дією постійного електричного струму мав практичний інтерес, обговорено в [120]. Він виконувався з технологічними параметрами відповідно до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Параметри обробки порошкової суміші

Компоненти	Дисперсність, мкм	Густина струму, А/см ² (А/см ²)	Температура, °С	Тривалість електрофізичної дії, с (хв)	Підпресовування двохстадійне, МПа	Результат
Мідь марки ПМС-1 [91] + алюміній [95]	(~60) + (~100)	1,6-2,0×10 ⁶ (160-200)	600-650	60-120 с (1-2 хв)	1→10 (останні 10 с)	Взаємодія закінчується. Алюміній та інтерметаліди на його основі: CuAl ₂ і Cu ₉ Al ₄
Розпилені мідні гранули + алюміній [95]	(650-750) + (~100)	2,0-2,5×10 ⁶ (200-250)	800-900	120-180 с (2-3 хв)	1→10 (останні 10 с)	Утворення навколо прошарку 1-2 мм із інтерметалідами CuAl ₂ і Cu ₉ Al ₄ . Зменшення діаметру частинки Cu до ~400 мкм

Вияснилося, що взаємодія між компонентами закінчується в даній системі при використанні мідних порошоків марки ПМС-1 дисперсністю ~60 мкм [91] вже при температурі 873-923 К (600-650 °С) із тривалістю витримки 60-120 с (1-2 хв). Завдяки рентгеноструктурними дослідженнями фазовий склад отриманих зразків був наступним: алюміній та інтерметаліди на його основі – CuAl₂ і Cu₉Al₄.

При використанні мідних гранул із дисперсністю 650-750 мкм (0,65-0,75 мм) (таблиця 4.7), повного завершення взаємодії між компонентами у системі Cu-Al під дією електричного струму не проходило і при подальшому підвищенні температури до 800-900 °С за час 120-180 с (2-3 хв). Мідні гранули, внаслідок утворення навколо них прошарку товщиною 1-2 мм із інтерметалідами CuAl_2 і Cu_9Al_4 , зменшилися у діаметрі приблизно до 400 мкм (0,4 мм).

Наступним кроком було визначення вмісту речовини твердого компонента, що розчинився в алюмінії. Для досягнення результату (відповіді) були використані пари металів із взаємними протилежностями електропровідностей в елементарній комірці порошкові системи. Тобто використали дисперсні пресовки на основі Cu-Al і Ni-Al. Технологічні параметри електро-термічної обробки є схожими із тими, що були застосовані із початковими даними для ведення теоретичних досліджень і зведені до таблиці 4.8:

Розрахунки, що проводилися відповідно до алгоритмічної схеми та зображеної на рисунку 4.17, опиралися на використання рівня максимально досяжної концентрації речовини осердя порошкової частинки, поверхня якого розчинюється у навколишньому середовищі і становить із часом деяке визначене (стале) значення c_s . Узявши до уваги максимально досяжне значення концентрації можна вирахувати ймовірну величину розчинення поверхні тіла твердої компоненти в речовині прошарку, що оточує, по механізму дифузії електроконвективного типу. На основі експериментальних даних методами морфометрії була визначена максимально можлива концентрація міді і, відповідно, нікелю, що могли розчинитися в розплавленому алюмінію [114, 139, 141].

Таблиця 4.8 – Параметри електро-термічної обробки

Порошкова система	Cu-Al,	Ni-Al	
	Для розрахунку і експериментів	Для розрахунків	Для експериментів
Початкова величина радіусу частинки, м (мкм)	35×10^{-6} (35)	35×10^{-6} (35)	20×10^{-6} (20)
Коефіцієнт комірки, k	2		
Виміряна температура, К ($^{\circ}\text{C}$)	~1003 (~730)		
Загальна тривалість обробки, с (хв)	120 (2)		
Густина електричного струму, A/m^2 (A/cm^2)	$3,2\text{-}4,5 \times 10^6$ (320-450)		

Величина концентрації міді (Cu) після проведених розрахунків **дорівнює 37 % мас.**, що природно відрізняється від узятій із діаграми врівноваженого стану для системи Cu-Al з величиною $k=2$, де $c_s=12$ % мас. [120, 149, 150, 151]. Для випадку використання порошку нікелю (Ni), як "осердя" елементарної комірки, концентрація його складала 54% мас., хоча значення, що може бути взяті із діаграми врівноваженого стану для системи Ni-Al з величиною $k=2$, досягає тільки $c_s=24$ % мас., [114, 120, 139, 141].

Наступним кроком було продовження ведення розрахунків відповідно до алгоритмічної схеми (рисунок 4.17) для сферичної системи координат (рисунок 4.2). Була розрахована величина критерія Шервуда для систем Cu-Al і Ni-Al. При вказаних умовах (таблиця 4.8), що базуються на практичних результатах, проведення обчислень показало, що для системи Cu-Al критерій Шервуда набуває значень від 148 до 183, а для Ni-Al системи – від 66,6 до 82,2. Достатньо широко цю тенденцію відображає та таблиця 4.9. На основі запропонованого підходу щодо висвітлення теорії дифузії електроконвективного типу практично обчислені значення числа Шервуда, які в умовах проходження процесу консолідації суміші на основі Cu-Al досягає ~463.

Якщо поглянути на ці дані (таблиця 4.9), де є величина різниці між електропровідностями Cu-Al чи Ni-Al, то побачимо наступне. Пари Cu-Al різниця електропровідностей по модулю майже вдвічі більша ніж для пари Ni-Al, а комплексна величина Λ має фактично віддзеркалене значення. Можна

сказати, що одне значення Δ відрізняється від іншого вдвічі із переходом через нуль.

Таблиця 4.9 – Результати розрахунків для порівняльного аналізу

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

Згадана умова збільшення різниці між електропровідностями автоматично впливає на збільшення швидкості переміщень речовини по прошарку (рисунок 4.8, 4.9), а це, у свою чергу, збільшує ефект масовіддачі твердої поверхні у навколишнє середовище. Ефект дії різниці електропровідностей між твердою поверхнею і розплавленою компонентою враховує формула (4.46), що і відбивається на результатах обчислень.

Це є свідчення про великі практичні можливості щодо інтенсифікації внутрішніх процесів та збільшення загальної концентрації міді, яка зможе розчинитися і утворити нові фазові компоненти із алюмінієм та вмістом більшим ніж це можливо за використанням традиційних умов проведення процесу консолідації порошкових сумішей.

Отримані результати, що базуються на записах таблиць 4.4 і 4.5 та відповідають практичним умовам проведення експериментів є зведеними до таблиці 4.9.

Виконані математичні розрахунки і експериментальні дослідження по обробці постійним електричним струмом дисперсних об'єктів (складу, де у подібні твердої компоненти слугують частинки міді або нікелю, а оболонкою, як навколишній прошарок – алюміній) показали на виході значення їх величин концентрацій, що у 2-3 рази перевищують теоретичні (таблиця 4.9).

Виявлена практична розбіжність у розрахованій величині концентрації, та на основі практично отриманих результатів, можлива за рахунок наявності в процесі проведення експериментів додаткової дифузії реакційного типу, котра йшла одночасно із дифузиею електроконвективного типу і вносила свій вклад у прискорення взаємодій на межі переходу [11, 114, 120, 139, 141, 148].

Висунутий на обговорення факт присутності інтенсифікації процесу масоперенесення, що призводить до збільшення ступеня взаємодії між компонентами і додаткового насичення одним іншого завдяки явищу дифузії електроконвективного типу надає можливості по іншому поглянути на створення прогресивних технологічних підходів з метою отримання і матеріалів промислового вжитку та деталей машин [140].

4.4. Висновки по розділу 4

При використанні моделі поведінки порошкового тіла та елементарної комірки, що знаходяться під дією постійного електричного струму визначено особливості формування структури композицій типу метал-метал, що входять до складу металевий 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 AC 200, 400/315 мкм) на прикладі складників, які мають основну взаємодію при спіканні – порошку міді і матриці, що плавиться, олова.

Обробка, де застосували дію електричного струму, забезпечує набагато інтенсивніший ступінь взаємодій для складників Cu-Sn до 20 разів по тривалості обробки, ніж коли була проведена звичайна термічна обробка в муфельній печі. За рахунок дії сил електричного походження від пропускання електричного струму розплавлена компонента в приповерхневому прошарку твердої мідної частинки переміщується із швидкістю до $3-3,5 \times 10^{-6}$ м/с, що є достатньою умовою для проходження повних взаємодій між складниками за 120 с.

Фізичні зміщення в дисперсному тілі, котре складається з розплавленого олова і твердих частинок із жаростійкого сплаву на основі нікелю (Ni-Cr-Mo-W) чи корунду (Al_2O_3) ініціюються завдяки комплексній дії квазіархімедової сили електромагнітного походження термічно-гравітаційного походження.

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.

Вивчено особливості формування структури металевих систем між компонентами композиції Cu-Al та Ni-Al при переміщенні твердих частинок, які є складовими в матеріалах інструментального призначення при отриманні їх під дією спрямленого постійного струму.

На основі експериментальних даних методами морфометрії була визначена максимально можлива концентрація міді і, відповідно, нікелю, що могли розчинитися в розплавленому алюмінію. На прикладі металевої зв'язки абразиввміщуючого матеріалу інструментального призначення, до складу якої входить мідь (Cu) і алюміній (Al) (таблиця 2.2), величина концентрації міді (Cu) дорівнює 37 % мас., що є "перенасичення" для комірки з $k=2$, де $c_s=12$ % мас. є звичайним при застосуванні традиційних методів спікання. Для випадку використання порошку нікелю (Ni), як "осердя" елементарної комірки, концентрація його складала 54% мас., хоча значення, що може бути взяте із

діаграми врівноваженого стану для системи Ni-Al з величиною $k=2$, досягає тільки $c_3=24$ % мас.

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.

Підтвердженням даного висловлювання є практичні експерименти, що описані у Розділі 5.

РОЗДІЛ 5 ОТРИМАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ АЛМАЗ-МЕТАЛЕВА ЗВ'ЯЗКА

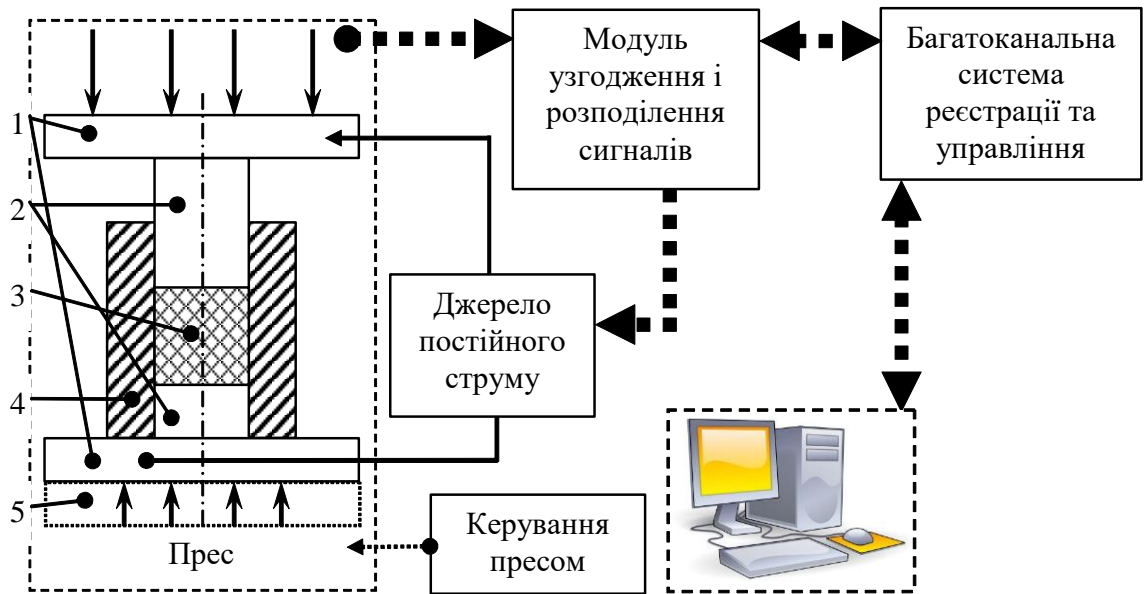
5.1 Отримання композиційного матеріалу під дією постійного струму

Літературні джерела мають великий опис, спрямований на вивчення за результатами досліджень даних по виготовленню матеріалів інструментального призначення із порошкових композицій складу алмаз + металева зв'язка шляхом при використанні змінного струму 50 Гц або ж методу гарячого пресування.

Використання отриманих інструментів із порошкових композицій складу алмаз + металева зв'язка з метою обробки, наприклад, технічного скла (типу К8) показало, що інструменти, отримані під дією електричного струму 50 Гц, продемонстрували продуктивність в 3-3,16 разів більшу ніж інструменти, що отримані за методом гарячого пресування [50]. В поданому прикладі практичне застосування електротехнології забезпечило значну перевагу в порівнянні з традиційною (термомеханічної) технологією.

В ряді випадків доцільно проводити із використанням спрямованого змінного струму, коли мова йде про порошкові композиції, які погано проводять на початковій стадії консолідації електричний струм, наприклад, де є керамічні, абразивні складові [157, 159]. Для проведення досліджень використовувалася установка ЕРАН 2/1. Загальна схема установки наведена на рисунку 5.1.

Під час роботи прес-інструмент завжди розташовувався на нижній струмопідвідній плиті преса і підпрасовувався під невеликим навантаженням (рисунок 5.2) для забезпечення надійного електричного контакту при проходженні електричного струму. Через прес-інструмент пропускався постійний електричний струм.



1 - струмопідвідні плити гідравлічного преса, 2 - електроди-пуансони з високоміцного графіту, 3 - оброблювана порошкова суміш, 4 – матриця прес-інструменту з високоміцного графіту, 5 – блок для здійснення безперервного механічного навантаження на порошкову суміш.

Рисунок 5.1 – Схема доопрацьованого обладнання ЕРАН 2/1

Були визначені технологічні режими проведення досліджень. Повний час процесу консолідації, загальна величина густини електричного струму крізь графітову матрицю – є основні чинники під час отримання композиційного матеріалу, що містить 50% алмазу марки АС 200 400\315 50% і зв'язки складу: 40% Cu + 11% Sn + 44% Co + 5% Cr . Час тривалості експерименту визначився із практичного досвіду – коли процес усадження порошкової композиції практично закінчується. Температура спікання контролювалася за допомогою хромель–алюмелевої термопари і складала на поверхні зразка приблизно 800-950 °С. Тиск підпресовування в графітовому прес–інструменті підтримувався на рівні, котрий забезпечував надійний електричний контакт між пуансонами та компонентами порошкової композиції і складав до 60 МПа. Дослідна партія зразків була виготовлена при технологічних параметрах, що наведені в таблиці 5.1.



а

б

а – перед електрообробкою, б – перед випресовуванням зразка

Рисунок 5.2 - Зовнішній вигляд прес-форми

Таблиця 5.1 – 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 електроспікання	140-160 с
4	Температура спікання	800-950 °С

Було визначено, що основний процес ущільнення композиційного порошкового матеріалу починається при температурі на поверхні прес-інструмента приблизно при 400 °С і закінчується через 1,5-2 хв після початку процесу під дією спрямованого постійного електричного струму (рисунок 5.3) [18].

Початок процесу інтенсивного усадження говорить про те, що в матеріалі, що формується, з'явилася рідка фаза, яка заповнює простір між частинками порошку.

Під час проведення експериментів до порошкової суміші прикладають тиск підпресовування величиною до 60 МПа. Крім проведення процесу ущільнення порошкової суміші тиск підпресовування необхідний також і для забезпечення належного електричного контакту під час обробки між

частинками порошкової суміші, а також із графітовими пуансонами. Після попереднього підпресовування порошкової суміші та при подальшому незмінному навантаженні величиною 60–80 МПа на електропровідні пуансони подається постійний електричний струм (рисунк 5.3).

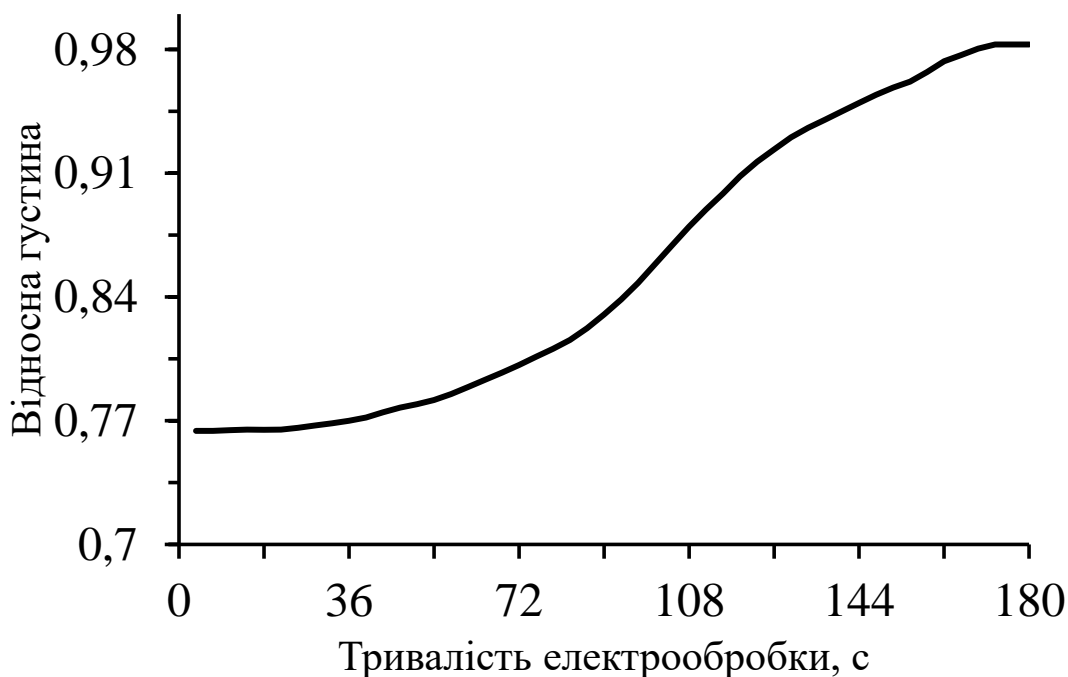


Рисунок 5.3 – Відносне усадження зразка на основі міді, олова, кобальту, хрому і алмазів

Основна усадка відбувається приблизно від 15-ї до 50-ї секунди спікання. При досягненні заданої температури зразок витримують ізотермічно протягом 20–40 с по закінченні процесу основного усадження, Після чого роблять охолодження до кімнатної температури.

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 °С нижче ніж зазвичай і скоротити тривалість електрообробки, як було визначено у розділах 3 і 4.

За час досліджень отримано дослідні зразки діаметром 10 мм і висотою 4,8-5,5 мм. Зразки виймалися із прес-інструмента та підготовлялися до металографічних вимірювань, тобто проводилися очистка зразків від графітового змащування (яке дозволяє вільно випресовувати зразки із прес-інструмента після процесу спікання), геометричні вимірювання зразків та зважування.

Під час проведення процесу консолідації зроблена і відпрацьована технологічна схема отримання елементів (рисунок 5.4) для обробки різних нерудних матеріалів (наприклад, мармуру, граніту) з використанням дисперсних порошкових матеріалів промислового виробництва [89, 90, 91, 92].



Рисунок 5.4- Схема отримання алмазних елементів із зв'язкою на основі Cu-Sn-Co-Cr на ЕРАН 2/1

5.2 Рентгеноструктурні дослідження алмазвміщуючих матеріалів за різних умов отримання

З метою перевірки та визначення змін в складі зразків після їх консолідації були проведені рентгеноструктурні дослідження і по дифрактограмам визначався стан складу зразків.

Рентгенівська зйомка була проведена на автоматизованій установці ДРОН-3М. Дифрактограми отримували в мідному випромінюванні. Зйомку профілю дифракційних ліній виконували по точках з кроком сканування 0,10 і часом витримки в кожній точці спектру 5 с. Рентгенівську зйомку дифракційних рефлексів проводили використовуючи Соллеровську відкриту діафрагму.

Рентгенофазовому аналізу був підданий зразок типу таблетка (ЕРАН 2/1), що містив 50% алмазу марки АС 200 400\315 50% і зв'язки складу: 40% Cu + 11% Sn + 44% Co + 5% Cr. Рентгенофазовий аналіз показав, що після електрообробки фазовий склад зразка в основному характеризувався наявністю бронзи складу $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$. Кобальт виявляється як в чистому вигляді з рефлексами [101], [002] так і в можливій присутності в з'єднанні складу CoCu_2Sn , а так само як і $(\text{Co}, \text{Cu})_{5,6}\text{Sn}$. Виявлено чіткі рефлекси алмазу. Хром в чистому вигляді не виявлений, так як його зміст малий і він може входити в твердий розчин з кобальтом (рисунок 5.14).

Проведена була таким самим чином і рентгенівська зйомка на промислово отриманий зразок у якого зв'язка на основі Co + 50,0 % АС 200, 400/315. Дифракційна картина зразка в вертикальному положенні була інформативною (рисунок 5.15).

Рефлекс алмазу присутній із 100-ю інтенсивністю разом із рефлексами кобальту, які гарно проявилися на дифрактограмі.

З метою перевірки дії електричного струму на стан алмазу було проведено його рентгенівський аналіз.

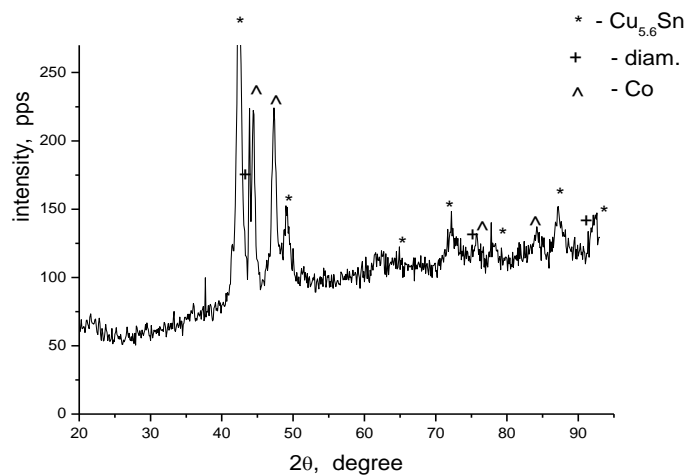


Рисунок 5.14. Дифрактограма від зразка складу 50%АС 200+ 50%(Си+Sn+Co+Cr) (EPAN 2/1)

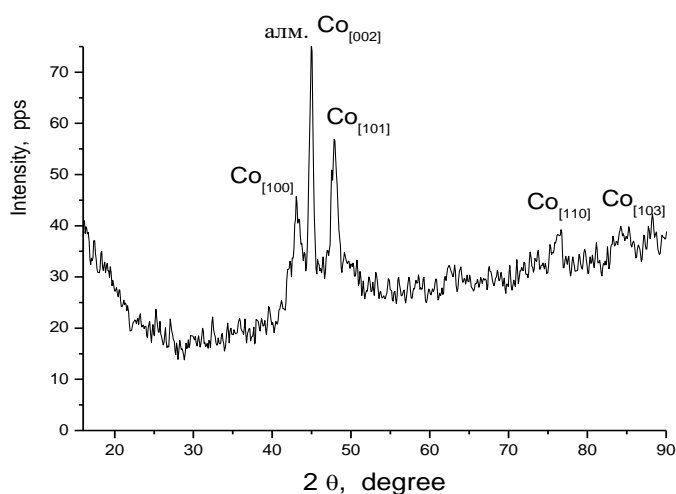


Рисунок 5.15. - Дифрактограма зразка, що отриманий в промислових умовах

Протестований порошок чистого алмазу марки АС 200 400\315, який розмістили в кюветі діаметром 12 мм і закріпили скотчем. Визначено рефлекси скотча: $22,37$; $25,72$; $28,48^0$ з метою подальшого їх вирахування при розшифровці дифрактограм. Рефлекси алмазу проявилися вузьким чітким

дуплетом на подвійному куті $43,9^{\circ}$ и $44,04^{\circ}$ одним широким рефлексом на подвійному куті 42° (рисунок 5.16).

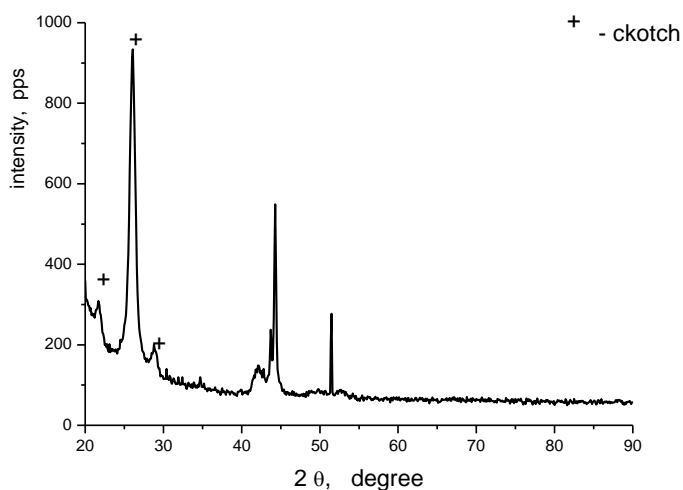


Рисунок 5.16 - Дифрактограма алмазу АС 200 400/315

Були змінені умови рентгенівської зйомки з метою виявлення початкового стану алмазу: порошок засипали в кювету з алюмінієвої фольги і закріплювали скотчем. При таких умовах зйомки проявилися всі сильні рефлекси алмаза на подвійних кутах: $43,85$; $77,36$; $91,81^{\circ}$. Рефлекси від скотчу також були присутні на тих же значеннях кутів: $22,37$; $25,72$; $28,48^{\circ}$ (рисунок 5.17).

Як видно із дифрактограм, стан алмазу після спікання під дією електричного струму такий самий, як і початковий. Тобто, за даних умов отримання абразиввміщуючого матеріалу по технології спікання під дією електричного струму, не проходить будь-яких змін із абразивом, що позитивно позначається на працездатності виробів.

Розроблена методика розрахунку щодо 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%. Зниження енергоємності виробництва – це

сприятлива умова для притягнення уваги вітчизняних компаній в сукупності із впровадженням сучасних технологій отримання абразиввміщуючих матеріалів інструментального призначення на основі Cu-Sn-Co-Cr.

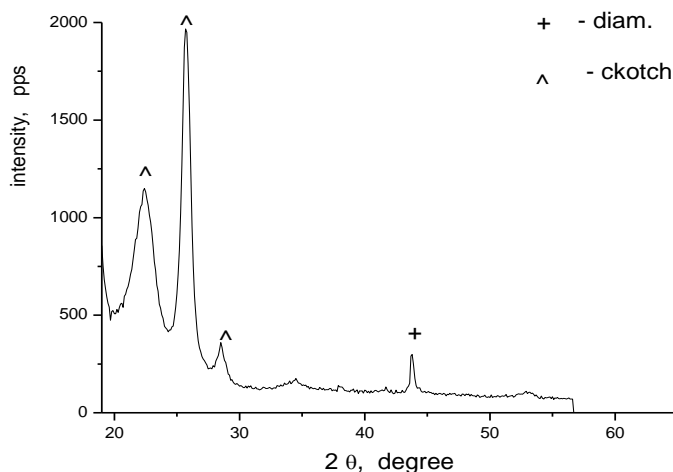


Рисунок 5.17 .Дифрактограма алмазу АС 200 400/315 в алюмінієвій кюветі

5.3. Експериментальна перевірка алмазвміщуючого матеріалу інструментального призначення, аналіз отриманих результатів

З метою визначення технічних характеристик зразків інструментального призначення алмазвміщуючих матеріалів провели випробування по визначенню твердості не тільки отриманих, а й зразків порівняння, які отримані у промислових умовах.

Твердість вимірювали за допомогою твердоміра моделі ТК-2М/ Результати вимірювань зведено до таблиці 5.2.

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).

Таблиця 5.2 – Твердість зразків, отриманих різними методами

№ п/п	Умови отримання	Зв'язка, склад	Твердість, HRB
1	Отримано на установці ЕРАН 2/1 за розробленими режимами	((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	55-85
2	Серійні промислові сегменти інструментального призначення (ТОВ "ІНСТЕХ" (пресування + спікання))	Основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	83-87
3	Серійні промислові сегменти інструментального призначення (пресування + спікання)	Склад марки "ТІТАН" (зв'язка М1+10%Ті) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	100-106

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. Їх застосовували для всіх типів абразиввміщуючих матеріалів. Ними були граніт і мармур у формі круглого диска зазначеного розміру діаметром 180 мм і товщини 20-23 мм (рисунок 5.5).

Відповідно до таблиці 5.3 занесено режим проведення випробувань та типорозмір контр тіл [160, 161].

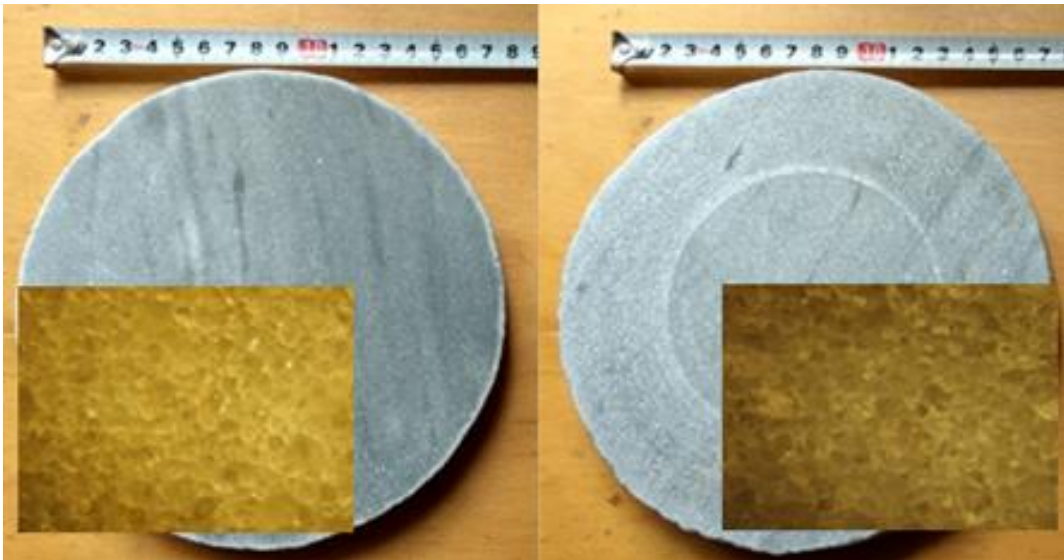


Рисунок 5.5 – Зовнішній вигляд контртіла мармур до (зліва) та після (справа) випробувань

Таблиця 5.3 – Режим проведення випробувань на працездатність

№ п/п	Склад матеріалу інструментального призначення	Загальна тривалість випробування кожного зразка, хв	Періодичність зняття показників, хв
1	((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	90	15
2	Основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	90	15
3	Склад марки "ТІТАН" (зв'язка М1+10%Ті) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	90	15

Перед і під час випробувань інструмент та контртіла додатково не оброблювалися та не підготовлювалися. Починали їх використовувати у початковому стані. Одночасно випробувалась партія інструменту в кількості 4 шт. Загальний час випробувань однієї партії зразків складав 90 хв (рисунок 5.6)



Рисунок 5.6 – Затискач для зразків

Під час проведення визначалося зменшення маси контртіла через кожні 15 хв. Зважування проводили на лабораторних вагах із точністю до 2-го знаку після коми. Результат загального зменшення маси контртіла для кожного складу інструмента занесено до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Загальне зменшення маси контртіла за 90 хв випробувань

№ п/п	Склад матеріалу інструментального призначення	Загальне зменшення маси контртіла	
		Граніт темно-сірий (Головіно), г	Мармур світло-сірий (Коєлга), г
1	((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	195,88	870,58
2	Основа Co + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	296,63	518,68
3	Склад марки "ТІТАН" (зв'язка M1+10%Ti) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм)	27,61	517,72

Випробування проводилися при обробці граніту і мармуру (Коєлга).

На рисунку 5.7 приведена поверхня зламу алмазних сегментів складу: ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), отриманих на устаткуванні ЕРАН 2/1.

Ті що стирчать із зв'язки алмазні зерна є сіро-зеленого кольору, тому що це монокристали. Видно, що вони добре тримаються. Після електроспікання алмази виглядають, як у стані постачання, що вказує на щадівний режим отримання зразків.

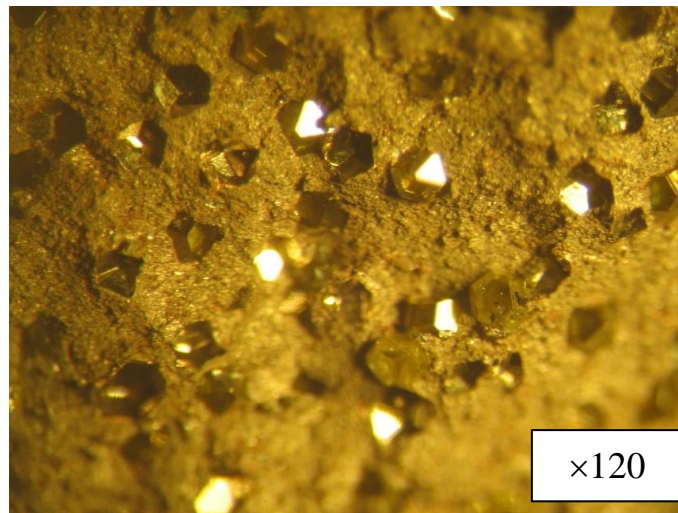


Рисунок 5.7 – Поверхня зламу алмазних сегментів складу (44,0 % Co + 40,0 % Cu + 11,0 % Sn + 5,0 % Cr)+ 50 % АС 200, 400/315 (ЭРАН 2/1)

На рисунку 5.8 наведено зовнішній вигляд поверхні інструменту складу ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), (ЕРАН 2/1) після проведення лабораторних випробувань. На поверхні чітко видно виступаючі над робочою поверхнею алмазні зерна, що свідчить про їхнє гарне утримання зв'язкою.

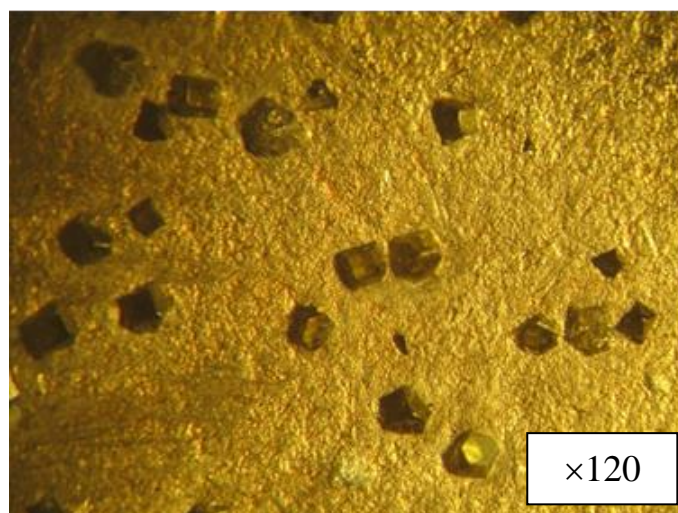
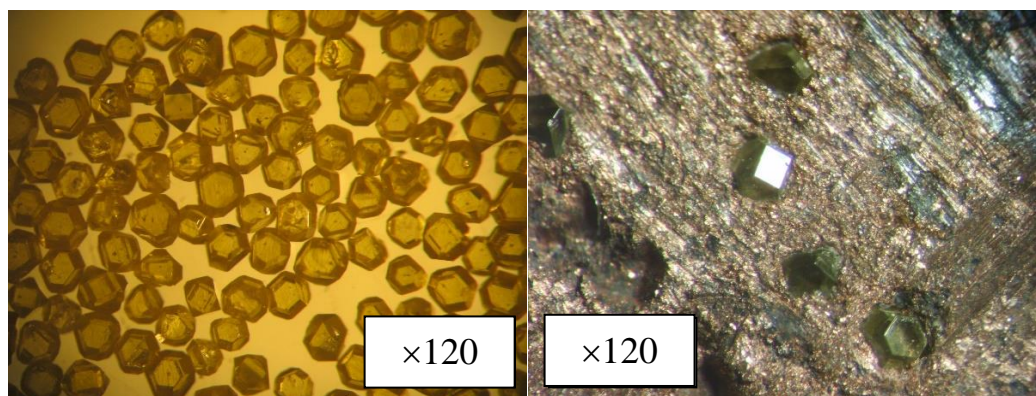


Рисунок 5.8 - Зовнішній вигляд поверхні ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) (ЕРАН 2/1), після випробувань

Після виготовлення алмазних інструментальних елементів та обробки твердих матеріалів алмазний порошок не змінюється, що й демонструє рисунок 5.9.



а

б

а – вихідний алмазний порошок АС 200 400/315;

б – АС 200 400/315в зв'язці після випробувань (ЕРАН 2/1);

Рисунок. 5.9 – Вигляд алмазного порошку до та після випробувань

З метою порівняння були проведені лабораторні випробування по визначенню абразивної здатності алмазних сегментів, отриманих в промислових умовах по обробці граніту і мармуру.

Склад сегментів зв'язки становив Основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм).

На рисунку 5.10 наведена поверхня зламу алмазних сегментів складу: зв'язка основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), що отримані в промислових умовах.

На рисунку 5.11 наведено зовнішній вигляд поверхні інструменту основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), отриманих в промислових умовах коли проведено лабораторні випробування.

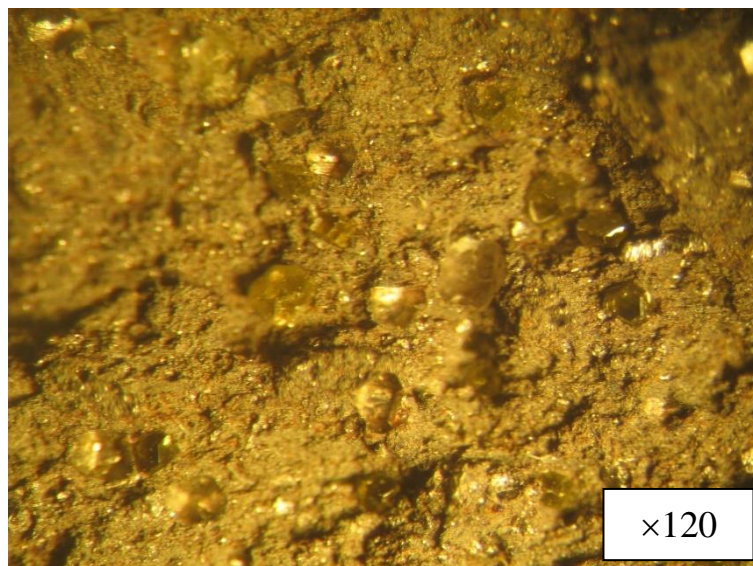


Рисунок 5.10 – Поверхня зламу алмазних сегментів на основі Со + 50,0 % АС 200, 400/315, отриманих в промислових умовах

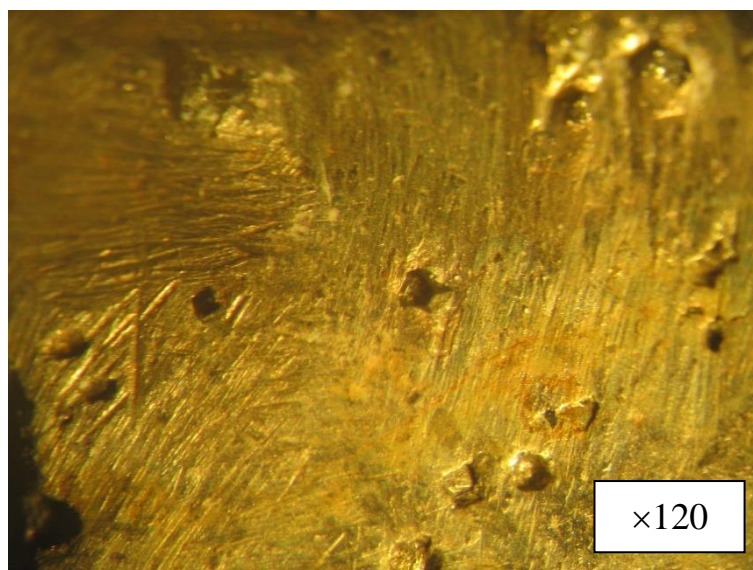


Рисунок 5.11 - Зовнішній вигляд поверхні складу основа Со + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), отриманого в промислових умовах, після випробування

Також були проведені лабораторні випробування по визначенню абразивної здатності алмазних елементів, отриманих в промислових умовах Склад марки "ТІТАН" (зв'язка М1+10%Ті) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм).

На рисунку 5.12 наведена поверхня зламу алмазних елементів, отриманих в промислових умовах ("ТІТАН").

На поверхні зламу чітко видна мідь, що не прореагувала з іншими елементами зв'язки. Даний факт підтверджується рентгенофазовим аналізом.

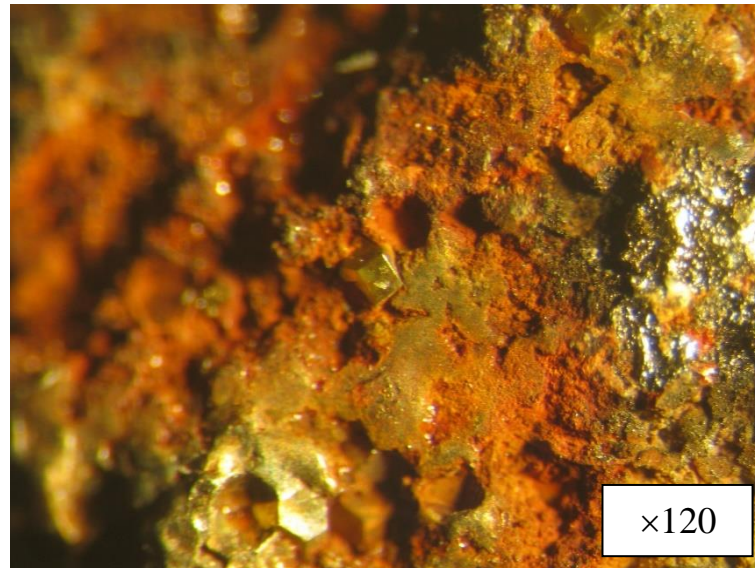
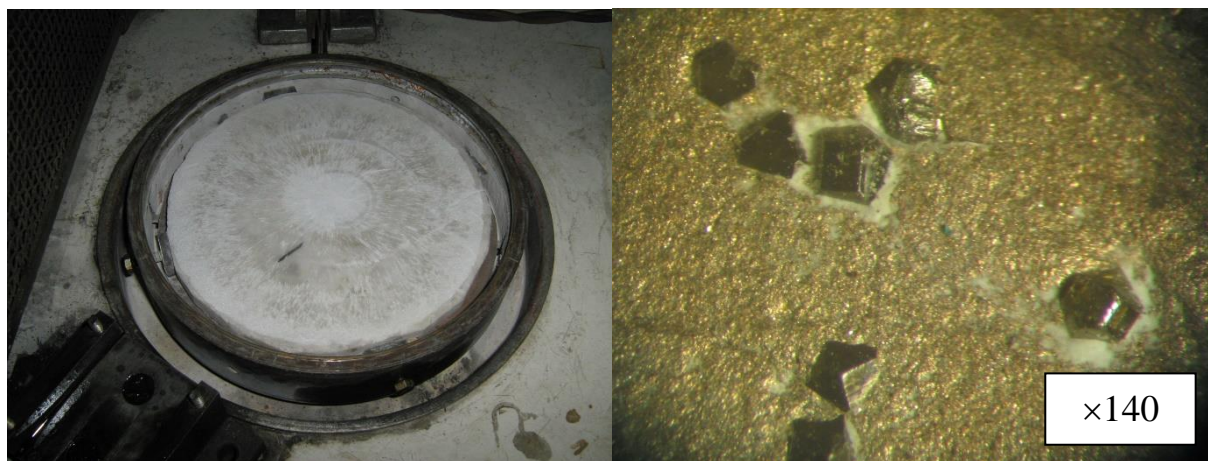


Рисунок 5.12 - Поверхня зламу алмазних елементів "ТІТАН"

Ці сегменти працюють погано при обробці такого граніту, але інструмент не засалюється.

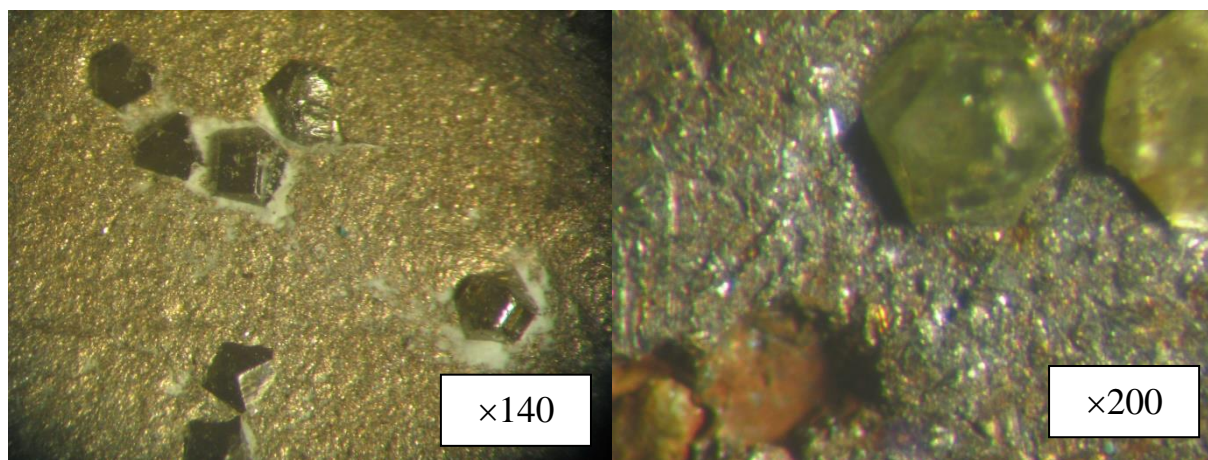
На рисунку 5.13 наведено зовнішній вигляд поверхонь мармуру (а) і поверхні елементів, отриманих в промислових умовах марки "ТІТАН" (зв'язка М1+10%Ті) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), після проведення лабораторних випробувань (б, в).

Поверхня після випробувань шорстка, видно виступаючі алмазні зерна, видно глибокі лунки де випали зерна. Після проведених експериментальних випробувань було використано загальновідому методику розрахунку абразивної здатності, яка враховує зменшення маси контртіла у часі і загальну площу ковзання інструмента по контртілу. Результати розрахунків на основі випробувань занесено до таблиці 5.5.



а

б



в

г

а – контртіло - мармур;

б, в, г – інструмент складу: Cu-Sn-Ti + 50 % АС 200 400/315.

Рисунок 5.13 – Зовнішній вигляд поверхні елементів, отриманих в промислових умовах ("ТІТАН"), після випробування

Видно, що абразивна здатність при обробці мармуру для всіх випробовуваних алмазвміщуючих інструментів значно вища, ніж в порівнянні, як при обробці граніту. Це відбувається через хорошу абразивність мармуру, яка сприяє розкриттю (оголенню) абразивних зерен інструменту (над поверхнею зв'язки) і, з іншого боку, підвищеною міцністю граніту, тобто його відомої важкістю щодо обробки інструментом.

Таблиця 5.5 – Досягнуті значення працездатності

Склад (мас.%)	Середня абразивна здатність, г/см ² 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)	0,6931	3,0806	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 "ТІТАН" (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)

Додатково композиційний матеріал складу ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм), що був отриманий по відпрацьованим режимам в ПІМ НАНУ ім. І.М. Францевича на устаткуванні ЕРАН 2/1 при пропусканні спрямованого постійного електричного струму був випробуваний на працездатність по обробці граніту та мармуру в ТОВ "НПК "АГРОППРОМДЕТАЛЬ" (акт від 22 грудня 2020 року) при застосуванні промислового обладнання типу верстат важелевий шліфувально-полірувальний "Блеск" та рекомендований для виготовлення сегментів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів (граніту, мармуру) (Додаток А).

Вітчизняний ринок потребує конкурентоспроможної із імпортною продукції. Впровадження на вітчизняному ринку сучасних технологій отримання виробів, якими є технологія спікання під дією електричного струму дозволить отримувати порівняно недорогий і високоякісний продукт, який за своїми характеристиками здатний скласти конкуренцію більшості зносостійких виробів в Україні і за кордоном.

Висновки по розділу 5

Аналіз літературних даних по розробці та виготовленню композиційних матеріалів за участю алмазних порошків показав, що експлуатаційні характеристики таких матеріалів можуть бути підвищені в 1,5-2 рази за рахунок застосування технології, яка використовує для спікання постійний струм у порівнянні із методом гарячого пресування.

Визначено умови отримання композиційних алмазвміщуючих матеріалів на установці ЕРАН 2/1, що забезпечує економію енергетичних ресурсів до 20%.. Показано, що основним рушійним фактором є густина струму та швидкість нагрівання. Встановлено, що найбільш оптимальні властивості композиційного матеріалу складу ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) досягаються при застосуванні струму густиною $8,28 \times 10^6$ А/м² та загальній тривалості процесу, що не перевищує 120 с.

Досліджені властивості працездатності композиційних алмазвміщуючих матеріалів. Показано, що композиційні матеріали можуть бути використані для обробки граніту та мармуру. При цьому, за рахунок збереження первинного стану поверхні алмазу при їх отриманні на установці ЕРАН 2/1, працездатність може бути більш вищою для обробки граніту ($0,6931$ г/см² хв) та мармуру ($3,0806$ г/см² хв), ніж у матеріалів, виготовлених у промислових умовах до двох разів.

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 високотемпературних матеріалів на основі абразив-металевих систем.

1. Запропоновано модель елементарної комірки двокомпонентної 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%Al₂O₃. 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 спрямованого 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 спрямованого 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 спрямованого

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/м², 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 зішліфовування відповідно до ГОСТ 25594-83 по граніту та мармуру. Визначено, що середня абразивна здатність по граніту склала 0,6931 г/см² хв., а по мармуру 3,0806 г/см² 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%Ті).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розробка науково-технологічних основ синтезу дисперсних та ущільнених композитів, що містять вуглець та метали, електроплазмовою обробкою та електророзрядним спіканням: Звіт про НДР (Ш-11-09), (заключний), / ІПМ НАН України, кер.: гол.наук.співроб., д-р техн. наук Райченко О.І. – Київ, 2011. – 162 с. - № держреєстрації 0109U000701.
2. "Створення обладнання для одержання металевих та керамічних композитів іскро-плазмовим спіканням порошків", Етап 1 "Розробка експериментального зразка обладнання для іскро-плазмового спікання порошків": Звіт про НДР (Ш-2-11, договір від 2011.02.07 № 285, 2011 р.), (проміжний), / ІПМ НАН України, кер. докт. техн. наук, гол.наук.співроб. Райченко О.І. – Київ, 2011 р. 61 с. – № держреєстрації 0111U002897.
3. Uhlmann D. R., Chalmers V., Jackson K. A. Interaction between particles and a solid-liquid interface // *J. Appl. Phys.* – 1964. – 35. – P. 2986–2993.
4. Степанчук А. Н., Бильк И. И., Бойко П. А. Технология порошковой металлургии. – К.: Вища школа, 1989. – 415 с.
5. Райченко, А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 129 с.
6. S. Meagher, R.S. Borch, J. Groza, A.K. Mukherjee and H.W. Green II. Activation parameters of high-temperature creep in polycrystalline nickel at ambient and high pressures // *Acta Metall. Mater.* – 1992. – V. 40, No 1. – P. 159-166.
7. Ishiyama M. Plasma activated sintering (PAS) system. // *Proceedings of 1993 Powder Metallurgy world congress.* – 1993. – P. 931-934.
8. Минько, Д. В. Теория и практика получения функциональноградиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Бежавин, В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2020. – 450. – ISBN 978-985-583-551-7.
9. Grasso, S. Electric current activated/assisted sintering (ECAS): a review of patents 1906–2008 / S. Grasso, Y. Sakka, G. Maizza // *Science and Technology of Advanced Materials.* – 2009. – V. 10. – P. 1–24.

10. Raychenko O.I., Syzonenko O.M., Derev'yanko O.V. Dynamic aspects at electric discharge sintering of powders // International Conference on Sintering. Kiev, Ukraine.- September 7–11. 2009. P. 48.

11. Дерев'янку А.В. "Явление переноса в дисперсных композициях типа твердое тело – жидкий металл в условиях электрофизических воздействий". – Тези 3 Міжнародної конференції HighMatTech. – Київ, Україна. – 3-7 жовтня 2011р. С. 217.

12. Буренков Г.Л., Райченко А.И., Сураева А.М. Макроскопический механизм образования межчастичного контакта при спекании порошков электрическим током // Порошковая металлургия. – 1989. – №3. – С. 34–39.

13. Дерев'янку 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.

14. H. U. Kessel, J. Hennicke, R. Kirchner, T. Kessel. Rapid sintering of novel materials by fast/sps – further development to the point of an industrial production process with high cost efficiency / Сайт компанії FCT Fine Ceramics Technologies GmbH & Co KG [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.fct-systeme.de .

15. Hong Peng. Spark Plasma Sintering of Si₃N₄-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm University S-10691 Stockholm Sweden 2004, 104 p.

16. 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: звіт про НДР Ц/7-02, 2002-2006 рр. (заключ.) / ІПМ НАН України, кер. Рагуля А.В. – Київ, 2006. – 128 с. - № держреєстрації 0102U001247.

17. Анненков Ю.М., Акарачкин С.А., Ивашутенко А.С. "Физический механизм искрового плазменного спекания керамики". Интернет-конференция “Бутлеровские чтения”. <http://butlerov.com/readings/>, 2012. Vol.31. No.9. P.130-137.

18. Лучка М.В., Дерев'янюк О.В., Ковальченко М.С., Кіндрачук М.В. Консолідація непровідних різальних елементів абразивного інструменту. – Порошкова металургія. – 2014. – № 5–6. С. 13–22.

19. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб пособие. - М.: Выс. Школа. - 1983. – 463 с.

20. Григорьев, Е.Г. Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков: Учебное пособие / Е.Г. Григорьев, Б.А. Калинин. – М.: МИФИ, 2008. – 152 с.

21. Grigoryev E.G. Kinetics of densification processes of powder materials under electropulse sintering // The arabian journal for science and engineering. 2009. Вып. № 34.

22. Бежавин К.Е., Мазюк В.В., Минько Д.В., Шелег В.К. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов. Минск, 1997. 180 с.

23. Створення обладнання для одержання металевих та керамічних композитів іскро-плазмовим спіканням порошків, Етап 1 "Розробка експериментального зразка обладнання для іскро-плазмового спікання порошків": Звіт про НДР (П-2-11), (Договір від 2011.02.07 № 285), (проміжний), / ІПМ НАН України, кер.: гол.наук.співроб., д-р техн. наук Райченко О.І. – Київ, 2011. – 61 с. - № держреєстрації 0111U002897.

24. А.С. № 818079 СРСР. Установка для электророзрядного спекания виробів з порошку / Райченко О.І., Байденко А.О. та ін. - Оуб. 1 груд. 1980.

25. Патент України № 13161. Усакін С.І., Громова Т.В., Купін І.В., Буренков Г.Л., Истомина Т.І., Райченко О.І. Установка для горячего пресования виробів з порошків шляхом пропускання електричного струму. Бюл. № 1, 1997 р.

26. Буренков Г.Л., Истомина Т.И., Райченко А.И., Сравнительные исследования свойств инструментов, полученных электроспеканием и горячим прессованием // Порошковая металлургия. – 2000. – №11-12. – С. 34–39.

27. Райченко А.И., Истомина Т.И., Троян И.А. Спекание порошков при наложении электрического тока и периодических механических импульсов // Порошковая металлургия. – 2000. - №3-4. – С. 105–109.

28. А.С. №1757176 СССР. Металлическая связка алмазно-абразивного инструмента / Буренков Г.Л., Кононенко В.В., Истомина Т.И. и др. – Оpubл. 1992 г.

29. Патент України. №13157. Металева зв'язка алмазно-абразивного інструменту / Буренков Г.Л., Кононенко В.В., Истомина Т.И. та інші. – Бюл. № 1, 1997 р.

30. А.с. 725815 СССР. Устройство для спекания металлических порошков / Райченко А.И., Лещинский В.И., Буренков Г.Л., Кононенко В.В.,. – Бюл. № 13; 1980. 05.04.80.

31. Аль-Хасани. Электроразрядное уплотнение порошков. – В кн.: Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии // Доклады Всесоюзной научной конференции. Минск: 1982. – с .83-91.

32. Рагуля, А.В. Скороход В.В. Консолидированные наноструктурные материалы. – Киев: Наукова думка. - 2007. – 374 с.

33. Реология. Теория и приложения. – Ред. Ф. Эйрих. М.: "ИЛ". – 1962. – 824 с.

34. Орпер Г.М. Влияние электрического тока на поле скоростей около движущейся непроводящей капли и на скорость её растворения в электропроводной жидкости // Магнитная Гидродинамика. 1974. №3. С.52-56.

35. Еременко В. Н., Натанзон Я.В. Кинетика растворения металлов в металлических расплавах в условиях внешней задачи. // Порошковая металлургия. – 1970. – № 8. – С. 39-54.

36. Кузьменко П. П. "Электроперенос, термперенос и диффузия в металлах", Киев В. Школа, 1983, – 152 с.

37. Белащенко Д.К., Магидсон И.А. Об электрпереносе твердых частиц в жидких металлах и о пограничном слое жидкости // Физика металлов и металловедение. – 1966. – Т. 22, № 2. – С. 294–297.

38. Кафаров В. В. Основы массопередачи. Учебник для студентов ВУЗов. 3 изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
39. Фикс В. Б. О влиянии конвекции на диффузию // Журнал технической физики. – 1964. – Т. 27, № 6. – С. 1282-1288.
40. Еременко В. Н. и др. Дослідження взаємодії матеріалів з металевими розплавами // Журнал: Вісник АН УРСР. – 1973. – № 9. – С. 17–27.
41. Белащенко Д. К. Явление переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970 г. – 399 с.
42. Raychenko O.I., Raychenko O.O. Joint Influence of Gravitational, Temperature, Electric, and Magnetic Fields upon the Appearance of Convection in a Conducting Fluid Medium // Ukrainian Journal of Physics 2002, - Vol.47, - No 12, p. 1130-1138.
43. W.Q. Zhang, Y.F. Zhu, Yang and Z.Q. Hu. Structure of Al-Cu Eutectic Alloy Solidified in Complex Field of Centrifugal and Electromagnetic Forces // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). - V. 10, - No 2, P. 120-126.
44. Yuan. Yang, Yuef. Zhu, Zhuan. Hu. Modelling of Solute Redistribution in Alloys During Solidification in an Electromagnetic Field – Papers of International Congress "Electromagnetic Processing of Materials" . – Kurashiki. Paris, France. – 26–29 May. 1997. – P. 431–436.
45. Свойства меди и ее сплавов: сборник / отв. ред. А.А. Пресняков. – Алма-Ата: Наука, 1969. – 160 с.
46. Савицкий К.В., Итин В.И., Козлов Ю.И., Савицкий А.П. Влияние дисперсности алюминиевого порошка на спекание сплава Cu–Al в присутствии жидкой фазы. – Порошковая металлургия. – №11. – 1965г. – стр. 19–25.
47. Савицкий К.В., Итин В.И., Козлов Ю.И. Исследование механизма спекания металлокерамических сплавов меди с алюминием в присутствии жидкой фазы. – Порошковая металлургия. – №1. – 1966. – стр. 5–11.
48. Найбороденко Ю.С., Итин В.И., Савицкий К.В. Реакции на межфазовых границах и их влияние на процесс спекания. I. Экзотермический эффект при спекании порошков // Порошковая металлургия. – № 7. – 1970. – С. 49–56.

49. Козлов Ю.И., Итин В.И. Реакционная диффузия в смеси порошков меди и алюминия. // Порошковая металлургия. – № 6. – 1973. – С. 20–28.
50. Блум Э. Я., Заке М. В. и др. "Тепло- и массообмен в электромагнитном поле". Рига, 1967. – 223 с.
51. Raitchenko A.I., Kolesnichenko A.F., Chemeris V.T. Conducting fluid flow around spheroid of different conductivity under stable electrical current influence. // International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. – 1994. – Nagoya, ISIJ. – P. 460–465.
52. Витков Г. А. О растворении металлических сфер в электрическом поле. // Магнитная Гидродинамика. – 1976. - № 3.– С. 142-143.
53. Аксельруд Т. А., Орпер Г. М. Массообмен между твердым сферическим телом и токонесущей жидкостью // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т. 27, №6. – С. 1015–1018.
54. Орпер Г. М. Численное исследование гидродинамики и массообмена сферы в токонесущей жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1979 – № 3. – С. 38–42.
55. Орпер Г.М. Воздействие электромагнитного поля на движение проводящей жидкости вблизи сфер и на массоперенос с ее поверхности // Магнитная гидродинамика. – 1980. – №4. – С. 69–72.
56. Raitchenko A. I., Raitchenko A. A., Chernikova E. S. The mathematical model of the process of the dissolution of the solid particle in the liquid metal under the conducting of the electric current // J. Physique IV, 1993.Colloque C7, suppl. 7. Physique III, V. 3, nov., P. 1229-1233.
57. Райченко А.И., Карюк Г.Г., Лещинский В.И. Эксплуатационные характеристики алмазных хонинговальных брусков, изготавливаемых методом электроразрядного спекания // Порошковая металлургия. – 1977. – №8. – С. 92–94.
58. Орпер Г. М. Движение электропроводной жидкости около капли под действием электромагнитного поля // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 3. – С. 39–42.

59. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – С. 509–514.
60. Конвекция. Физический энциклопедический словарь. – М.: Изд-во сов. энциклопедия, 1962. – Т. 2. – С. 436.
61. Левич В. Г. Физико–химическая гидродинамика. – Гос. изд–во физ.–мат. лит–ры, Москва, 1959. – 699 с.
62. Gerbeth G., Mutshke G., Eckert S. Magnetohydrodynamic flow phenomena. // Forschungszentrum Rossendorf. Institute for Safety Research. Annual Report 1994, P. 72 – 76.
63. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. М.: Химия, 1982. – 696 с.
64. Chow C. Y. Flow around a nonconducting sphere in a current–carrying fluid. // Phys. Fluids. – 1966. – V. 9, – No 5, – P. 933 – 936.
65. Chow C. Y., Halat J. A. Drag of a sphere of arbitrary conductivity in a current–carrying fluid. // Phys. Fluids, 1969. – V. 2, – No11, – P. 2317 – 2322.
66. Райченко А.И., Райченко А.А., Черникова Е.С., Мирошниченко А.Д. Анализ электроконвективного растворения проводящей твердой сферы в токнесущей жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1994. – № 1. – С. 71–76.
67. Райченко А.И., Райченко А.А., Теория течения токнесущей жидкости проводящей среды вокруг инородного включения при различных условиях на поверхности включения - среда // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1995.– Вып. 32. – С. 46–50.
68. Райченко О.І. Математична теорія дифузії в додатках. – Київ. – 1981. – 396 с.
69. Таблицы физических величин. / Под ред. Кикоина И.К., справочник, – М.: Атомиздат, 1976, – 1006 с.
70. Дриц Е.М., Бургерс П.Б., Бурханов Г.С. и др. Свойства элементов; справочник, - М.: Металлургия. - 1985, - 375 с.
71. Свойства элементов, под редакцией Самсонова, 2-е издание перераб. и дополненное, справочник, - М., Металлургия. - 1976, - 599 с.

72. Справочник химика. Т. 3. – 2-е изд. – М.; Литература. 1964. – 1005 с.
73. Райченко А.И. К теории диффузионных эффектов в жидко-фазной композиции под воздействием электрических и температурных полей // Укр. Физ. Журнал. - 1984.- Т. 29, № 8.- С. 1221-1225.
74. Назарчук С. Н., Бочечка А. А., Гаврилова В. С., Романко Л. А., Белявина Н. Н., Александрова Л. И., Ткач В. Н., Кузьменко Е. Ф., Заболотный С. Д. Поликристаллический композиционный материал алмаз–карбид вольфрама // Сверхтвердые материалы. – 2011. – № 1. – С. 3–17.
75. Бочечка А.А., Назарчук С.Н., Гадзыра Н.Ф., Гаврилова В.С., Белявина Н.Н. Термодинамическая оценка взаимодействия в системе С–W–О при спекании нанокompозита алмаз – карбид вольфрама при высоком давлении // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения, № 14, 2011 г. С. 310-316.
76. Бочечка А.А., Гадзыра Н.Ф., Назарчук С.Н., Гаврилова В.С., Романко Л.А., Белявина Н.Н., Черниенко А.И. Композит алмаз-карбид вольфрама на основе алмазного порошка АСМ 1/0. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Збірник наукових праць. № 9, 2012 г. с. 244–247.
77. Попов В.П., Шатохин А.М., Райченко А.И., Гончаров С.В., Назаренко В.А. Структура и свойства карбида вольфрама, полученного электроразрядным спеканием дисперсного порошка. // Порошковая металлургия. –1995. - № 9/10. – С. 17–20.
78. G.Zhang, Z.Jin, and X.Yue. TiN-TiB₂ Composites Prepared by Reactive Hot Pressing and Effect of Ni Addition. // J.Am.Ceram.Soc. – 1995. – No 78 (10). – P. 2831-2833.
79. Петухов О.С., Дерев'янюк О.В., Рагуля А.В., Райченко О.І., Скороход В.В., Попов В.П.. Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі нітриду титану. – Патент України на винахід №79526 Зареєстровано у ДРПУ на винаходи 25.06.2007.

80. Patent 5794113A USA. Simultaneous synthesis and densification by field-activated combustion / Zuhair Abdul Razzak Munir, In-Jin Shon, Kazuo Yamazaki. – № US 08/432,603; fil. 05.11.95; publ. 09.11.98.

81. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слисарева Е.Н., Цыпин М.И. Окисление титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1970. – 320 с.

82. Рябина О.Н. Технологические принципы выбора материалов пресс инструмента при электроразрядной обработке металлических порошков. - Вестник ОГУ. – 2006. - № 10, Ч. 2. – С. 414–421.

83. Болдин М.С. Электроимпульсное плазменное спекание керамики на основе Al_2O_3 . Электронное методическое пособие. - Нижний Новгород, 2011. - 47 с.

84. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания. Электронное учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород, 2012. - 59 с.

85. Шмегера Р.С. Интенсивное электроспекание металлических матриц алмазосодержащих композитов в присутствии жидкой фазы // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. – 2011. – № 14. – С. 507–510.

86. Майстренко А.Л., Иванов С.А., Переяслов В.П., Волошин М.Н. Интенсивное электроспекание алмазосодержащих композиционных материалов // Сверхтвердые материалы. – 2000. – № 5. – С. 39–45.

87. Лещинский В.И., Моцак Я.Ф., Лавриненко И.А., Юга А.И., Левина Д.А., Райченко А.И., Найдич Ю.В. Влияние металлизации алмазных зерен на эксплуатационные характеристики хонинговальных брусков, полученных методом электроразрядного спекания // Алмазы и сверхтвердые материалы. Научно-технический сборник. – Москва, 1978. – вып.6. – С. 2–4.

88. Функциональные порошковые наноматериалы: учебно-методический комплекс: в 4 т.: Т. 2. / В. К. Нарва, В. С. Панов –М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. – 148 с.

89. Порошок алмазний синтетичний марки АС200 315/400 згідно ГОСТ 9206-80: Порошки алмазные. Технические условия.
90. Порошок кобальту марки ПК-1У згідно ГОСТ 9721-79: Порошки кобальту. Технічні умови.
91. Порошок міді марки ПМС-1 згідно ГОСТ 4960-75: Порошок медный электролитический. Технические условия.
92. Порошок олова розпилений марки ПО-1 згідно ГОСТ 9723-73: Порошок оловянный. Технические условия.
93. Порошок никелю марки ПНЭ-1 згідно ГОСТ 9722-79: Порошок никелевый. Технические условия.
94. Порошок корунду (Al_2O_3) марки К згідно ТУ 14-146-125-93: Матеріал абразивний із феросплавних шлаків.
95. Порошок алюмінію згідно ГОСТ 11069-64 чи ГОСТ 11069-2001: Алюминий первичный. Марки.
96. Водорозпилений порошок сплаву В95 згідно складу по ГОСТ 4784-97: Алюміній і сплави з алюмінію, що деформуються. Марки. Технічні умови.
97. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник. Под ред. к.т.н. Соседова В.П. М.: Металлургия, 1975 г. – 335 с.
98. Рогайлин М.Ю., Чалых Е.Ф. Справочник по углеграфитовым материалам. М.: Химия, 1974 г. – 208 с.
99. Конструкційний графіт марки МПГ-6 згідно ТУ 01-58-69.
100. Технічна документація на комплекс дослідницького обладнання типу ЕРАН 2/1 1976 р. випуску.
101. Байденко А.А., Свечков А.В., Попов В.П., Истомина Т.И., Гольдберг М.Ш., Зарицкий А.Н. Материалы пресс-форм для ЭРС порошковых композиций на основе Cu– Sn, Cu–Zn // Порошковая металлургия. – 1988. - №12. – С. 81–84.
102. Рябинина О.Н., Райченко А.И., Буренков Г.Л. Структурные изменения в спеченных объектах и материалах оснастки при электроразрядном спекании

смесей металлических порошков. - Порошковая металлургия. - 1976. - №11. С. 16-21.

103. Райченко А.В., Рябина О.Н. Стойкость материалов электродов-пуансонов и матриц в процессе электроразрядной обработки металлических порошков. - Электронная обработка материалов. – 1977. - № 3. - С. 38-41.

104. Самохоцкий А.И., Кунявский М.Н. Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов. М.: Машиностроение, 1981. – 174 с

105. Приборы и методы физического металловедения, в 2-х томах, Под ред. Ф. Вейнберга, Пер. с англ. Предисловие В.Н. Колесникова, – Изд-во Мир, Москва, 1974. – 368 с.

106. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия. – 1976. – 271 с.

107. Хоменко А.І., Хоменко Е.В. Програма автоматизації мікроструктурного аналізу матеріалів // Порошкова металургія – 2007. – №1/2. – С. 122–127.

108. Физические методы исследования металлов и сплавов: Учеб. пособие / Журавлев Л.Г., Филатов В.И. - Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – 157 с.

109. Механика. Методические указания к выполнению лабораторной работы "Определение плотности твердого тела методом гидростатического взвешивания". Составители: Рудин А.В., Евстифеев Вас.В., Костина Н.В., Першенков П.П. Под редакцией профессора Евстифеева Викт.В. - Пенза 2005. - 15 с.

110. Металлы и сплавы. Справочник". Под ред. Солнцева; НПО "Профессионал", НПО "Мир и семья"; Санкт-Петербург, 2003. - 1066 с.

111. Микротвердость материалов. Методические указания к лабораторной работе. - Сост. Паршев С. Н., Полозенко Н. Ю. ВолгГТУ, Волгоград, 2004. – 15 с.

112. Raitchenko A.I., Popov V.P., Derevyanko A.V. Velocity and Concentration Fields in Current-Carrying Liquid Filling Spherical Layer Space // Magnetic Hydrodynamics. - 1998. – V. 34, No 1. - P. 79-84.

113. Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко А.В. Сплавообразование в гетерогенной системе под действием электрического тока // Порошковая металлургия. - 2003. - № 5-6. - С. 16–20. (Raichenko A.I., Derevyanko A.V., Popov V.P. Alloy Formation in a Heterogeneous System under the Action of an Electric Current // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. - 2003. - V. 42, No 5-6. - P. 230-234).

114. Raichenko 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 // Металлофизика и Новейшие Технологии. – 1999. – т.21. №10. – С. 80-83. (Raichenko A.I., Derevyanko A.V., Popov V.P. Alloy concentration fields resulting at dissolving of solid particle in the surrounding current-carrying liquid metal // Metal Physics and Advanced Technologies. – 1999. – V.21. – N10. – P. 80-86).

115. А. С. № 565776 СССР. Устройство для электророзрядного спекания изделий из металлического порошка / Федорченко И.М., Карюк Г.Г., Лещинский В.И. и др. – Оpubл. 1977 г.

116. Райченко А.И., О теории диффузии частиц с магнитным моментом в условиях действия магнитного поля // Украинский физический журнал. – 1987.– Т. 32, № 1. – С. 142–147.

117. Райченко А.И., Буренков Г.Л., Хриенко А.Ф., Литвиненко В.Л. Исследование ЭРС двойных порошковых смесей // Порошковая металлургия. – 1968. – № 10. – С. 43–46.

118. Raichenko 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.

119. Райченко А.И., Сизоненко О.Н., Деревянко А.В. Возникновение вторичного порообразования и его влияние на усадку при электроразрядном спекании порошков. – В кн.: 6-я Международная конференция МЕЕ-2010. – Тез. докл. – Понизовка, Крым. С. 125.

120. 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): Звіт про НДР (1.6.2.5–97, 1997-2000 рр.), (заключний), / ІПМ НАН України, кер. академік НАН України, докт. техн. наук Ю.В. Найдич. – Київ, 2000 р. 45 с. – № держреєстрації 0193U017361.

121. Дослідження процесів масоперенесення та структуроутворення при обробці дисперсних сумішей електричним струмом з метою одержання композиційних матеріалів з металічною матрицею та наповнювачами: Звіт про НДР (1.6.2.13–01, 2001-2003 рр.), (заклучний), / ІПМ НАН України, кер. докт. техн. наук Райченко О.І. – Київ, 2003 р. 87 с. – № держреєстрації 01010001651.

122. Raitchenko A.I., Popov V.P., Derevyanko A.V. Behaviour of the solid alloy particles dispersed in liquid tin under the electric current passage. Proceeding of a symposium "Fluid Flow Phenomena in Metals Processing" (TMS-99), TMS (Minerals • Metals • Materials). Edited by N.El-Kaddah, D.G.C. Robertson, S.T. Johansen, and V.R. Voller. – San-Diego, USA. – 1999. – Febr. 28 – March 4. – P. 603-606.

123. 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.

124. Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко А.В. Перераспределение твердых инородных частиц в жидком металле, при пропускании электрического тока // Порошковая металлургия. - 2002. - № 7–8. - С. 1-7.

125. Райченко А. И. Об устойчивости жидкого проводника с током в поле тяжести. // ДАН СССР. – 1982. – т. 261, № 1. – С. 86–90.

126. Takeuchi E., Tanaka H., and Kajioaka H. Hydromagnetic separation of metal pool in the continuous casting strand // Intern. Sympos. Electromagn. Processing of Materials. – (Nagoya: ISIJ, 1994) P. 364–371.

127. Taniguchi S. and Brimacombe J. K. Separation of non-metallic inclusions from liquid metal by pinch force // Ibid. – P. 429–434.

128. Повх И. Л., Чекин Б. В. Магнитогидродинамическая сепарация. – К.: Наук. думка. – 1978 г. – 148 с.

129. Sassa K., Yamao H., Iwai K., Asai S. Separation of inclusions in liquid metal using alternating magnetic field // Electromagnetic Processing of Materials. Intern. Congr. Vol. 1. – (Paris: Centre Français de l'Electricite, 1997) P. 157–163.

130. Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко А.В., Истомина Т.И., Репенко А.И. Исследование динамического поведения расплавленного металла и твердых частиц при прямом прохождении электрического тока. – Збірник тез доповідей міжнародної конференції "Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике". – м. Київ, Україна. – 8-12 сен. 2003. С. 171–172.

131. Райченко О.І., Райченко О.О. Спільний вплив гравітаційного, температурного, електричного полів на виникнення конвекції у провідному текучому середовищі. – Укр. фіз. ж. – 2002. – Т.47, № 12. – С. 1130–1138.

132. Lord Rayleigh On convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on under side // Phil. Mag. – 1916. – V. 32, N 192 (6). – P. 529–546.

133. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. – М.: Гостехиздат, 1954. – 795 с.

134. 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. – Материалы третьей международной научно-технической конференции "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы". – Алушта, Крым, Украина. – 19-21 сентября 1997. – Т. 3, С. 1211–1216.

135. Райченко А.И. и др. Математическое моделирование процесса уплотнения при ЭРС // Порошковая металлургия. – 1996. – № 1-2. – С. 92–94.

136. Райченко А.И. и др. Модельное исследование спекания с энерговыделением в межчастичном контакте // Порошковая металлургия. – 1977. – № 8. – С. 92–94.

137. Деревянко А.В., Райченко А.И., Истомина Т.И., Ершова О.Г., Шлычок Е.Н. Консолидация алмазсодержащих порошковых композиций под действием электрического тока. – Тезисы докладов международной конференции HighMatTech. Киев, Украина.- 19-23 октября 2009. С. 294.

138. 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 // Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 1999, december 6-8.

139. 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.

140. Райченко А.И., Попов В.П., Деревянко А.В. Сплавление металлического порошка, суспендированного в жидком металле, с жидким металлом при пропускании электрического тока. – Сборник тезисов докладов на международной конференции "Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии" (РМ-97). – Киев. – 1997. – ноябрь. – С. 73

141. Райченко А.И., Деревянко А.В., Попов В.П. Концентрационные поля в сплаве, возникающие при растворении твёрдой частицы в окружающем токнесущем жидком металле. Сборник тезисов докладов на международном мемориальном симпозиуме в честь акад. Смирнова А.А. "Порядок в Металлах и Сплавах" (ПМС-98). – Киев. – 1998. – 16–19 ноября. – С. 14.

142. 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.

143. Истомина Т.И., Байденко А.А., Райченко А.И., Гольдберг М.А., Свечков А.В. Влияние давления подпрессовки при ЭРС на физико-механические свойства композиции медь – олово – абразив // Порошковая металлургия. – 1983. - № 11. – С. 98–102.

144. Raychenko A.I., Raychenko A.A., The theory of moving of current-carrying liquid metal with an inclusion inside respecting a different value of adhesion on the interphase surface // In: High Temperature Capillarity. Proc. of 1st International conference Bratislava; 1994. – P. 420–424.

145. Raitchenko A. I. (Raychenko O.I.), Mukai K. Theory of interaction between a solid inclusion in a liquid with non-uniform viscosity with an advancing solidification front // J. Appl. Phys. – 1999. – 86. – P. 2291–2299.

146. Лариков Л.Н., Исайчев В.И. Диффузия в металах и сплавах; справочник. – М.: Металлургия. – 1987. – 510 с.

147. Metals reference book: 3 vols. / Colin J. Smithells. – 4th ed., London: Butterworths, 1967. – 1974 p.

148. Райченко А.И., Деревянко А.В., Попов В.П. Интенсификация процессов сплавообразования в гетерогенном композите под действием электрического тока. – Збірник тез доповідей другої міжнародної конференції "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий". – Кацівелі – Понізовка Автономна республіка Крим, Україна 16-20 вересня 2002 г. С 78.

149. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем, В двух томах. М.: Физматгизд., 1959–1962., Т. 1 – 755 стр., Т. 2 – 982 с.

150. Дриц М.Е. и др. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. Справочник. М.: Наука, 1979. – 248 с.

151. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов, в двух томах. Справочник. М.: Металлургия, 1962. Т. 1. 608 с.

152. Замула М.В., Деревянко А.В., Колесниченко В. Г., Згалат-Лозинский О.Б., Рагуля А.В. Получение изделий различной формы из тугоплавких

соединений на основе Si_3N_4 методом электроразрядного спекания. – Порошкова металургія. – 2015. – № 1–2. С. 23–34.

153. Патент України на винахід №u30731 МПК (2006) C25D 17/00, C25D 15/00 Електролізер для нанесення композиційних електролітичних покриттів / Лучка М.В., Дерев'янка 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.

154. Істоміна Т.І., Попов В.П., Дерев'янка О.В., Райченко О.І., Безимянний Ю.Г., Волкогон В.М., Костенко А.Д. Одержання композиційних матеріалів антифрикційного призначення з металічною матрицею та алмазами динамічного синтезу методом електророзрядного спікання. – XXXVII Международнй семинар "Актуальные проблемы прочности" 2001 ". – Киев, Украина, 2001, 3-5 июля. – С. 235-236.

155. Ragulya A.V., Zgalat-Lozynskyy O.V., Kolesnichenko V.G., Derev'yanko O.V., Zamula M.V. Bulk nanocomposites in the system Ti-N-Al consolidated by electro-discharge sintering // International conference "Clusters and Nanostructured Materials". Abstracts. Uzhgorod, Ukraine. 2006. P. 296-297.

156. 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. – №a200507473; Заявл. 27.07.2005; опубл. 15.02.2007. Бюл. №9.

157. Патент України № 70138. МПК C25P 17/00 C25P 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.

158. Патент України № u2019 05064. Спосіб виготовлення заготовок різальних інструментів із порошків швидкорізальних сталей / Гогаєв К.О.,

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

159. Рагуля А.В., Згалат–Лозинский О.Б., Колесниченко В.Г., Дерев'янюк А.В., Замула М. В., Райченко А.И. // Электроразрядное спекание нано TiN–AlN. . – Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы". – г. Киев, Украина. 26-30 сентября 2005 г. С. 752-753.

160. Derev'yanko O. V., Zgalat-Lozynskyi O. B. "Consolidation of powder materials based on diamond and ceramic-metal systems under electric current action". Abstracts of 6th International conference "HighMathTech 2019". – October 28-30, 2019. – Kyiv, Ukraine. P. 85.

161. 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)". Abstracts of 7th International Samsonov Conference "Materials Science of High Melting Compounds" (MSHMC). – May 25-28, 2020. – Kyiv, Ukraine. P. 39.

ДОДАТКИ

Додаток А

ТОВ “НВК “Агропромдеталь”
офіс 407, буд 21, вул. Січових
Стрільців, м. Київ, 04053, Україна
телефон / факс: +380 44 592 1542
e-mail: ahropromdetal@gmail.com

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи наукового співробітника Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Дерев’янка Олександра Васильовича “Особливості сплавоутворення при консолідації порошкових матеріалів на основі абразив-металевих систем під дією електричного струму” на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

м. Київ

22 грудня 2020 р.

Ми, що нижче підписалися, комісія у складі: голови – генерального директора Товариства з обмеженою відповідальністю “Науково-виробнича компанія “Агропромдеталь” (скорочено – ТОВ “НВК “Агропромдеталь”) Пустовіт Олени Юріївни та її членів – комерційного директора ТОВ “НВК “Агропромдеталь” Небожака Ярослава Івановича й фінансового директора ТОВ “НВК “Агропромдеталь” Денисюк Тетяни Вікторівни засвідчує, що у період з 2019 по 2020 роки були проведені промислові випробування зразків матеріалів інструментального призначення на основі алмаз-металева зв’язка [(40,0 % Cu + 11,0 % Sn + 44,0 % Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400 / 315 мкм) під дією спрямованого постійного струму у формі циліндрів висотою 5 мм і діаметром 10 мм, які отримані Дерев’янком Олександром Васильовичем в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України в процесі виконання його дисертаційної роботи.

Випробування проводилося для зразків інструментального призначення на основі алмаз-металева зв’язка, як прототипів елементів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів, що отримані в умовах пропускання спрямованого постійного струму (ШМ НАНУ) і зразків зрівняння, які було отримано в умовах реального виробництва на промисловому обладнанні підприємства ТОВ “НВК “Агропромдеталь”, що відповідає ГОСТ 25594-83, щоб визначити їх працездатність, тобто абразивну здатність (ефективність використання).

Комісія встановила, що середня абразивна здатність по граніту склала 0,6931 г / см² хв., а по мармуру 3,0806 г / см² хв., що в 1,7 – 2,3 рази краще аналогів, де металева зв’язка майже чистий кобальт, та отримані в промислових умовах ТОВ “Інстех” й сегменти марки “Титан” (склад: зв’язка М1 + 10 % Ti).

На підставі проведених тестувань, та розглянувши результати отримані в процесі виконання дисертаційної роботи Дерев’янка Олександра Васильовича комісія визначила, що отримані наукові й практичні результати можуть бути рекомендовані до використання на підприємстві з метою виготовлення сегментів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів.

ПІДПИСИ ГОЛОВИ І ЧЛЕНІВ КОМІСІЇ

Ген. директор ТОВ “НВК “Агропромдеталь”  Пустовіт О.Ю.
Ком. директор ТОВ “НВК “Агропромдеталь”  Небожак Я.І.
Фін. директор ТОВ “НВК “Агропромдеталь”  Денисюк Т.В.



Додаток Б

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у наукових фахових виданнях

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., **Деревьянко 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 одиначної твердої частинки).

8. Райченко А.И., Попов В.П., Дерев'янку 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'янку 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'янку О.В., Ковальченко М.С., Кіндрачук М.В. Консолідація непровідних різальних елементів абразивного інструменту // Порошкова металлургия. - Украина. – 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'янку 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).*

Матеріали конференцій:

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. (Истоміна Т.І., Попов В.П., Райченко О.І., 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'янку А.В., Истоміна 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'янку 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-Lozynskyy 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-Lozynskyy 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)

Додаткове відображення наукових результатів 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 C25P 17/00 C25P 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.

Апробація роботи. Основні результати роботи були представлені та обговорені на 16 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.