

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРДОВСЬКИЙ БОГДАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 655.3:621.3

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДРУКУВАННЯ ФАРБОВИХ
СТРУМОПРОВІДНИХ ШАРІВ

186 Видавництво та поліграфія

18 Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Богдан БАРДОВСЬКИЙ
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Киричок Тетяна Юріївна, доктор технічних наук, професор.

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Бардовський Б. О. Удосконалення технології друкування фарбових струмопровідних шарів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 186 Видавництво та поліграфія (18 Виробництво та технології). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – удосконалення технології друкування фарбових струмопровідних шарів на паперових основах шляхом удосконалення процесів попередньої обробки коронним розрядом і пост-обробки термоциклюванням у кліматичній камері для підвищення якості струмопровідних доріжок.

Друкована електроніка є одним із перспективних напрямів розвитку сучасних поліграфічних і електронних технологій, орієнтованих на створення гнучких, легких та функціональних електронних виробів. Особливий інтерес у цьому напрямі становить використання паперових основ як екологічно безпечних, доступних і придатних до масштабованого рулонного виробництва носіїв. Водночас природна пористість, шорсткість і гідрофільність паперу зумовлюють низьку адгезію та нестабільність електрофізичних характеристик струмопровідних шарів, сформованих друкарськими методами. Це обмежує можливості промислового застосування паперових основ у друкованій електроніці та потребує вдосконалення технологічних процесів їх підготовки й обробки. У зв'язку з цим актуальним науково-прикладним завданням є розроблення та обґрунтування технологічних рішень, спрямованих на підвищення якості, адгезії та стабільності струмопровідних шарів, нанесених трафаретним друком на паперові основи.

Робота безпосередньо узгоджується з темами ініціативних кафедральних науково-дослідних робіт: «Технології забезпечення якості фарбових та функціональних шарів»

та «Теоретико-методологічні засади забезпечення зносостійкості поліграфічної продукції».

Метою дисертаційної роботи є удосконалення технологічного процесу друкування провідних шарів трафаретним друком з урахуванням поверхневих властивостей паперових основ.

Для досягнення поставленої мети в роботі, основний зміст якої викладено в чотирьох розділах, виконано низку завдань.

У розділі 1 «Сучасний стан та проблеми створення елементів друкованої електроніки на паперових основах» проведено аналітичний огляд сучасного стану технологій друкованої електроніки, здійснено класифікацію методів нанесення функціональних шарів та матеріалів основ з урахуванням їх придатності до формування струмопровідних доріжок. Проаналізовано друкарські та вакуумні технології нанесення провідних шарів, виконано порівняння трафаретного, струминного друку та магнетронного напилення за критеріями собівартості, масштабованості, сумісності з паперовими основами та механічної стійкості. Досліджено властивості паперових, полімерних і гібридних основ, а також матеріали струмопровідних фарб, що застосовуються у друкованій електроніці. Узагальнено методи кількісної оцінки мікрорельєфу та поверхневої енергії паперових основ, включно з параметрами шорсткості, змочуваності та фрактальної розмірності, і сформульовано передумови для вдосконалення технологічного процесу формування струмопровідних шарів на папері.

У розділі 2 «Матеріали і методи дослідження» розроблено загальний алгоритм проведення експериментальних досліджень, спрямованих на оцінювання впливу попередньої обробки паперових основ на якість струмопровідних доріжок друкованої електроніки. Обґрунтовано вибір матеріалів, зразків паперових основ, струмопровідних фарб і металів, а також устаткування для проведення досліджень. Описано удосконалену методіку обробки поверхні паперу коронним розрядом із варіюванням режимів, методи формування провідних доріжок трафаретним друком і магнетронним напиленням, а також комплекс методів контролю морфологічних, адгезійних та електрофізичних

характеристик. Сформовано методику імітації експлуатаційних впливів, що включає механічні, хімічні та температурні навантаження, і визначено порядок вимірювання електричних параметрів до та після випробувань, що забезпечує відтворюваність і достовірність експериментальних результатів.

У розділі 3 «Дослідження стану поверхні паперових основ та якості струмопровідних шарів друкованої електроніки» наведено результати експериментальних досліджень щодо впливу попередньої обробки паперових основ коронним розрядом на морфологічні та фізико-хімічні характеристики їхньої поверхні. Проаналізовано зміну параметрів мікрорельєфу, змочуваності та фрактальної розмірності поверхні матового і глянцевого паперу залежно від режимів обробки. Досліджено взаємозв'язок між характеристиками поверхні паперових основ і електрофізичними показниками струмопровідних доріжок, сформованих трафаретним друком, зокрема питомим опором та стабільністю провідних властивостей. Встановлено закономірності впливу параметрів попередньої обробки на відтворюваність геометричних характеристик друкованих ліній та експлуатаційну стійкість провідних шарів.

У розділі 4 «Удосконалений технологічний процес підготовки паперової основи до нанесення електропровідних доріжок трафаретним друком» на основі результатів експериментальних досліджень розроблено та обґрунтовано удосконалений технологічний процес виготовлення елементів друкованої електроніки на паперових основах. Встановлено вплив параметрів попередньої обробки коронним розрядом і післядрукарської термічної обробки на морфологічні характеристики поверхні, змочуваність, фрактальну розмірність та електрофізичні показники струмопровідних доріжок. Із використанням методу аналізу ієрархій здійснено багатокритеріальне оцінювання факторів, що визначають якість і стабільність друкованих провідних шарів, та визначено раціональні режими обробки паперової основи. Сформульовано практичні рекомендації щодо вибору типу основи, режимів коронування і термообробки, а також

розроблено схему удосконаленого технологічного процесу, придатного для впровадження у виробництво елементів друкованої електроніки.

Результати виконання дисертаційної роботи полягають у тому, що:

Вперше:

- науково обґрунтовано раціональний технологічний процес нанесення елементів друкованої електроніки на паперових основах трафаретним друком на основі аналізу розроблених класифікацій способів нанесення, матеріалів основ, струмопровідних фарб та розробленої ієрархії факторів забезпечення якісних струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими методами, що дозволило *удосконалити* технологічний процес нанесення елементів друкованої електроніки на паперових основах із застосуванням трафаретного друку, де *вперше* комплексно, як цілісний процес, застосовано цілеспрямовану попередню обробку поверхні паперу коронним розрядом та термічну обробку у кліматичній камері, що забезпечило підвищення адгезійних властивостей та стабільності нанесених провідних шарів.

- встановлено взаємозв'язок режимів обробки коронним розрядом паперових основ різного виду, їх друкарсько-технічних властивостей (змочуваності, шорсткості тощо) та показників якості (електропровідність, стабільність питомого опору, цілісність тощо) струмопровідних доріжок на основі графенових фарбових композицій, нанесених трафаретним друком на паперових основах, що разом з обґрунтуванням раціонального режиму обробки, дозволяє забезпечити підвищення стабільності електричних характеристик друкованих провідних шарів.

- запропоновано новий підхід до кількісного визначення якості друкованих провідних шарів на паперових основах, який ґрунтується на запропонованому комплексному показнику якості, що формується як результат—урахування низки показників якості (електропровідність, стабільність опору тощо) одразу після нанесення, а також після випробувань з імітацією впливу зовнішніх факторів, що забезпечило комплексне багатфакторне оцінювання якості нанесених шарів.

- отримано комплекс експериментальних даних щодо зміни властивостей струмопровідних доріжок у результаті імітації зношування, а також встановлено кореляцію між технологічними режимами обробки шарів і зміною показників якості після імітації зношування, що дало змогу обґрунтувати вибір раціональних режимів обробки коронним розрядом, які підвищують комплексний показник якості.

- встановлено механізми формування зношеності друкованих струмопровідних шарів та виокремлено види пошкодження виробів з провідними доріжками на паперовій основі, що дозволило удосконалити методику дослідження експлуатаційних властивостей надрукованих провідних доріжок проведенням механічного стирання і термоциклування та дало змогу оцінити стабільність та довговічність сформованих провідних шарів.

Вдосконалено:

- методологію визначення зносостійкості струмопровідних фарбових шарів, яка ґрунтується на комплексному оцінюванні якості з урахуванням імітації комплексної дії механічних, хімічних і термічних впливів на зміну електричного опору, що дає змогу підвищити точність оцінювання інтенсивності процесів деградації дозволяє встановити взаємозв'язок між мікрогеометрією основи та стабільністю струмопровідних фарбових шарів.

Набула подальшого розвитку:

- методологія оцінювання стану поверхні паперових основ, яка базується на розрахунку фрактальної розмірності профілю за даними безконтактної профілометрії; це дозволило вперше встановити числовий взаємозв'язок між параметрами обробки коронним розрядом та зміною геометричної складності мікрорельєфу основи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вдосконаленні технологічного процесу виготовлення друкованої електроніки на паперових основах, зокрема у впровадженні попередньої обробки коронним розрядом та пост-обробки у кліматичній камері. Це дозволяє знизити опір струмопровідних доріжок, підвищити їхню адгезію та забезпечити стабільність функціонування електронних компонентів під

впливом зовнішніх факторів. Розроблено практичні рекомендації щодо промислового застосування паперових основ у виробництві друкованої електроніки, які включають раціональні режими попередньої обробки коронним розрядом та параметри термоциклової пост-обробки.

Ключові слова: паперові основи, трафаретний друк, електропровідність фарбового шару, термічна обробка, плазмова обробка поверхні, мікрорельєф поверхні, модифікація поверхні коронуванням, топографія поверхні, енергетичні параметри поверхні, струмопровідні пігменти, адгезія, зносостійкість, термічна стабільність, комплексний показник якості, друкована електроніка.

ANNOTATION

Bardovskyi B. O. Improvement of the technology for printing conductive ink layers. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in speciality 186 Publishing and printing (18 Production and technologies). – National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to solving an actual scientific and applied task – improving the technology of printing conductive ink layers on paper substrates by improving the processes of pre-treatment with corona discharge and post-treatment with thermal cycling in a climatic chamber to increase adhesion and reduce the resistance of conductive tracks.

Printed electronics is one of the promising areas in the development of modern printing and electronic technologies, focused on the fabrication of flexible, lightweight, and functional electronic products. Of particular interest within this field is the use of paper substrates as environmentally friendly, cost-effective, and suitable carriers for scalable roll-to-roll manufacturing. At the same time, the inherent porosity, surface roughness, and hydrophilicity of paper result in low adhesion and instability of the electrophysical characteristics of conductive layers formed by printing methods. This significantly limits the industrial application of paper substrates in printed electronics and necessitates the improvement of technological processes for their preparation and treatment. In this regard, an urgent scientific and applied task is the development and justification of technological solutions aimed at improving the quality, adhesion, and stability of conductive layers deposited by screen printing on paper substrates.

The work is directly aligned with the topics of the department's research initiatives: “Technologies for ensuring the quality of paint and functional layers” and “Theoretical and methodological foundations for ensuring the wear resistance of printing products.”

The aim of the dissertation is to improve the technological process of printing conductive layers using screen printing, taking into account the surface properties of paper substrates.

To achieve the set goal in the work, the main content of which is laid out in four sections, a number of tasks were completed.

Chapter 1 “Current state and challenges in the development of printed electronics elements on paper substrates” presents an analytical review of the current state of printed electronics technologies and provides a classification of functional layer deposition methods and substrate materials with regard to their suitability for forming conductive tracks. Printing and vacuum-based technologies for depositing conductive layers are analyzed, and screen printing, inkjet printing, and magnetron sputtering are compared in terms of production cost, scalability, compatibility with paper substrates, and mechanical stability. The properties of paper, polymer, and hybrid substrates, as well as conductive ink materials used in printed electronics, are examined. Methods for the quantitative evaluation of the surface microrelief and surface energy of paper substrates are summarized, including roughness, wettability, and fractal dimension parameters, and the prerequisites for improving the technological process of forming conductive layers on paper are formulated.

Chapter 2 “Materials and research methods” presents a general algorithm for conducting experimental studies aimed at evaluating the effect of paper substrate pre-treatment on the quality of conductive tracks in printed electronics. The selection of materials, paper substrate samples, conductive inks and metals, as well as the equipment used for the experiments, is substantiated. An improved methodology for paper surface treatment by corona discharge with varying processing regimes is described, along with methods for forming conductive tracks by screen printing and magnetron sputtering, and a comprehensive set of techniques for controlling morphological, adhesive, and electrophysical characteristics. A methodology for simulating operational effects, including mechanical, chemical, and thermal loads, is developed, and the procedure for measuring electrical parameters before and after testing is defined, ensuring the reproducibility and reliability of the experimental results.

Chapter 3 “Investigation of the surface condition of paper substrates and the quality of conductive layers in printed electronics” presents the results of experimental studies on the influence of corona discharge pre-treatment of paper substrates on the morphological and

physicochemical characteristics of their surfaces. Changes in surface microrelief, wettability, and fractal dimension of matte and glossy paper as a function of processing regimes are analyzed. The relationship between the surface characteristics of paper substrates and the electrophysical properties of conductive tracks formed by screen printing, in particular the sheet resistance and the stability of conductive properties, is investigated. The regularities of the influence of pre-treatment parameters on the reproducibility of the geometric characteristics of printed lines and the operational durability of conductive layers are established.

Chapter 4 “An improved technological process for preparing paper substrates for the deposition of conductive tracks by screen printing” presents the development and justification of an improved technological process for manufacturing printed electronics elements on paper substrates based on the results of experimental studies. The influence of corona discharge pre-treatment parameters and post-printing thermal treatment on surface morphological characteristics, wettability, fractal dimension, and electrophysical properties of conductive tracks is established. Using the analytic hierarchy process, a multicriteria evaluation of the factors determining the quality and stability of printed conductive layers is performed, and rational processing regimes for paper substrate treatment are identified. Practical recommendations for selecting the substrate type, corona treatment and thermal processing regimes are formulated, and a scheme of the improved technological process suitable for implementation in printed electronics manufacturing is developed.

As a result of the work, the following new scientific results were obtained:

For the first time:

- a rational technological process for depositing printed electronics elements on paper substrates by screen printing has been scientifically substantiated based on the analysis of the developed classifications of deposition methods, substrate materials, conductive inks, and the established hierarchy of factors ensuring the formation of high-quality conductive tracks deposited by printing techniques. This made it possible to *improve* the technological process for manufacturing printed electronics elements on paper substrates using screen printing, in which, *for the first time*, targeted pre-treatment of the paper surface by corona

discharge and thermal treatment in a climatic chamber were applied in an integrated manner as a unified process. The implementation of this approach ensured an enhancement of the adhesive properties and the stability of the deposited conductive layers.

- the relationship between the corona discharge treatment regimes of paper substrates of different types, their printing and technical properties (wettability, roughness, etc.), and the quality indicators (electrical conductivity, stability of sheet resistance, structural integrity, etc.) of conductive tracks based on graphene ink compositions deposited by screen printing on paper substrates has been established. Together with the substantiation of rational processing regimes, this relationship makes it possible to ensure improved stability of the electrical characteristics of printed conductive layers.

- a novel approach to the quantitative assessment of the quality of printed conductive layers on paper substrates is proposed, based on the developed integrated quality indicator. This indicator is formed by taking into account a set of quality parameters (electrical conductivity, stability of resistance, etc.) evaluated immediately after deposition, as well as after testing with simulated external influences. The proposed approach provides a comprehensive multifactor evaluation of the quality of the deposited layers.

- a comprehensive set of experimental data on changes in the properties of conductive tracks as a result of wear simulation has been obtained, and a correlation between the technological processing regimes of the layers and changes in quality indicators after wear simulation has been established. This made it possible to substantiate the selection of rational corona discharge treatment regimes that enhance the integrated quality indicator.

- the mechanisms of wear formation in printed conductive layers have been identified, and the types of damage in products with conductive tracks on paper substrates have been distinguished. This made it possible to improve the methodology for investigating the operational properties of printed conductive tracks by incorporating mechanical abrasion and thermal cycling, and enabled the assessment of the stability and durability of the formed conductive layers.

Has been improved:

- the methodology for determining the wear resistance of conductive ink layers *has been improved* based on a comprehensive quality assessment that accounts for the simulated combined effects of mechanical, chemical, and thermal influences on changes in electrical resistance. This approach increases the accuracy of evaluating the intensity of degradation processes and enables the establishment of a relationship between the microgeometry of the substrate and the stability of conductive ink layers.

Has been further developed:

- the methodology for assessing the surface condition of paper substrates *has been further developed*, based on the calculation of the fractal dimension of the surface profile using non-contact profilometry data. This made it possible, for the first time, to establish a quantitative relationship between the corona discharge treatment parameters and changes in the geometric complexity of the substrate surface microrelief.

The practical significance of the results obtained lies in the improvement of the technological process of manufacturing printed electronics on paper substrates, in particular in the introduction of preliminary corona discharge treatment and post-treatment in a climatic chamber. This allows to reduce the resistance of conductive tracks, increase their adhesion, and ensure the stability of electronic components under the influence of external factors. Practical recommendations have been developed for the industrial application of paper substrates in the production of printed electronics, which include rational modes of corona discharge pretreatment and parameters of thermal cycle post-treatment.

Keywords: paper substrates, screen printing, conductivity of ink layer, thermal treatment, plasma surface treatment, surface microrelief, surface modification by corona discharge, surface topography, surface energy parameters, conductive pigments, adhesion, wear resistance, thermal stability, integrated quality index, printed electronics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

I. Публікації у наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Kyrychok T., Klymenko T., **Bardovskyi B.**, Avdiakov Y. Improving the conductive properties of printed electronics layers by treating paper substrates with corona discharge before screen printing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2025. № 5(1 (137)). С. 19–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.339913>. Журнал індексується в Scopus (Q3).

Здобувачем здійснено виготовлення експериментальних зразків зі струмопровідними шарами на основі графенової фарби на паперових основах, розроблено методологію трафаретного друку та методики вимірювання електрофізичних характеристик.

Киричок Т. Ю.: сформульовано загальну наукову ідею дослідження щодо впливу попередньої обробки паперових основ коронним розрядом на покращення електрофізичних характеристик струмопровідних шарів.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію дослідження поверхневих характеристик паперових основ, зокрема параметрів мікрорельєфу, шорсткості та інших морфологічних показників, що визначають змочуваність і адгезійні властивості поверхні.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та визначено режими її застосування в межах експериментального дослідження.

II. Публікації у наукових фахових виданнях України:

2. Киричок Т. Ю., **Бардовський Б. О.**, Авдяков Є. В., Душейко М. Г. Вплив попередньої обробки паперової основи коронним розрядом на провідність металевих електродів для друкованої електроніки, нанесених магнетронним напиленням. Технологія і техніка друкарства, 2024. № (3(85)). С. 110–124. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(85\).2024.319104](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(85).2024.319104).

Здобувачем виконано безпосереднє проведення експериментальних вимірювань електрофізичних характеристик струмопровідних доріжок, зокрема вимірювання електричного опору для різних типів паперових основ і режимів обробки, а також обробку та аналіз отриманих експериментальних даних.

Киричок Т. Ю.: сформульовано загальну методологію дослідження.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та здійснено її практичну реалізацію під час підготовки експериментальних зразків.

Душейко М. Г.: розроблено методологію магнетронного напилення струмопровідних шарів, методу вимірювання електрофізичних властивостей отриманих покриттів.

3. Киричок Т. Ю, **Бардовський Б. О.** Класифікація методів друку та матеріалів друкованої електроніки. Технологія і техніка друкарства, 2024 № (4(82)). С. 22–40. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.291596](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596).

Здобувачем виконано безпосереднє аналітичне дослідження, включаючи опрацювання та систематизацію літературних джерел, аналіз методів друку, матеріалів основ і друкувальних матеріалів, а також підготовку основного тексту статті та узагальнення отриманих результатів.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальний науковий підхід та концептуальну ідею дослідження.

4. Киричок Т. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л., Гулевич С. О., **Бардовський Б. О.**, Романюк Ю. В. Дослідження відтворення кольору та штрихових графічних елементів сувенірної банкотної продукції. Технологія і техніка друкарства, 2023, № (3(81)), С. 4–14. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(81\).2023.293096](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(81).2023.293096).

Здобувачем безпосередньо проведено мікроскопічні дослідження штрихових графічних елементів, фотофіксація результатів, вимірювання ширини штрихів, участь в аналізі експериментальних даних та інтерпретації результатів.

Киричок Т. Ю.: формування наукової ідеї дослідження, загальне методологічне керівництво роботою, визначення напрямів аналізу та узагальнення результатів.

Клименко Т. Є.: участь у розробленні методики дослідження друкарських відбитків, аналіз впливу друкарсько-технічних характеристик паперу на якість відтворення графічних елементів.

Талімонова Н. Л.: участь у дослідженні кольоровідтворення, обробка та аналіз спектрофотометричних даних, участь у формуванні висновків щодо колірних відмінностей.

Гулевич С. О.: участь у підготовці експериментальних зразків, опрацювання результатів вимірювань, технічна підтримка досліджень.

Романюк Ю. В.: участь у підготовці матеріалів дослідження, аналіз літературних джерел, оформлення окремих розділів статті.

III. Публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій, проіндексованих у базі даних Scopus:

5. Kyrychok T., Vorobyova V., Klymenko T., Bilousova A., **Bardovskyi B.**, Volodko B., Avdiakov Y.. "Investigation of adhesive properties of polymer and paper printed substrates treated with corona discharge", Proc. SPIE 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics, 1381306 (10 November 2025); <https://doi.org/10.1117/12>.

Здобувачем здійснено підготовку паперових зразків до досліджень, включаючи формування експериментальних серій та їх технологічну підготовку перед обробкою і вимірюваннями.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальну наукову концепцію та методологію дослідження, визначено напрям аналізу впливу коронної обробки на змочуваність полімерних і паперових основ та здійснено загальне методичне керівництво роботою.

Воробйова В. І.: розроблено методологію вимірювання кута змочування поверхонь та вибір підходів до оцінювання гідрофільних властивостей матеріалів.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію обробки та інтерпретації експериментальних результатів, здійснено статистичне опрацювання даних і узагальнення отриманих закономірностей.

Білоусова А. О.: виконано безпосередні експериментальні вимірювання кута змочування досліджуваних зразків та підготовку первинних даних для подальшого аналізу.

Володько М. Ю.: виконано підготовку зразків картону, а також виготовлення та інтеграцію адитивних 3D-друкованих елементів у паперові та картонні основи.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки зразків коронним розрядом та здійснено безпосереднє коронування полімерних, паперових і плівкових зразків у межах експериментального дослідження.

6. Kyrychok T., Klymenko T., **Bardovskyi B.** "Nanoscale fractal analysis of watermarked paper surface topography studied by atomic force microscopy", Proc. SPIE 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 1293815 (5 January 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3012694>.

Здобувачем розроблено прикладну методологію розрахунку фрактальної розмірності поверхні паперу на основі цифрової обробки профілометричних і мікроскопічних даних та здійснено безпосередній розрахунок фрактальних параметрів і аналіз отриманих результатів.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальну наукову концепцію та методологію дослідження, визначено підхід до застосування фрактального аналізу для оцінювання мікрогеометрії поверхні захищеного паперу та здійснено загальне наукове керівництво роботою.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію профілометричних і мікроскопічних досліджень, включаючи використання механічної контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії, виконано безпосередні вимірювання профілю поверхні паперу, а також сформовано загальну методологію визначення фрактальної розмірності поверхні.

IV. Публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій:

7. **Бардовський Б. О.** Порівняльний аналіз трафаретного друку та магнетронного напилення для нанесення шарів друкованої електроніки на паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали 25 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. *Здобувачем проведено порівняльний аналіз трафаретного друку та магнетронного напилення як методів нанесення функціональних шарів друкованої електроніки на паперові основи, з урахуванням технологічних, економічних та експлуатаційних показників, що дозволило обґрунтувати доцільність використання трафаретного друку для паперових гнучких носіїв.*

8. **Бардовський Б. О.** Температурна стабілізація провідних доріжок, нанесених трафаретним друком графеновою фарбою на попередньо оброблені паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф. «Кваліологія книги» Львів. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2025. *Здобувачем проаналізовано вплив постдрукарської термічної обробки у кліматичній камері на електричні характеристики струмопровідних доріжок, нанесених графеновою фарбою методом трафаретного друку на попередньо оброблені паперові основи.*

9. **Бардовський Б. О., Авдяков Є. В.** Оцінювання зносостійкості струмопровідних треків на паперовій основі за умов механічного впливу. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. X Міжнар. наук.-техн. конф. (14–17 травня 2025, м. Харків) / редкол.: Чеботарьова І. Б., Вовк О. В., Дейнеко Ж. В. Київ: ТОВ «Видавництво Ліра-К», 2025. Т. 1. 33–34 с.

Здобувачем здійснено підготовку експериментальних зразків зі струмопровідними доріжками на паперовій основі, виконано імітацію механічного зношування та безпосереднє проведення випробувань з оцінювання зносостійкості, а також обробку й аналіз експериментальних результатів.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та здійснено безпосереднє коронування зразків у межах експериментального дослідження.

10. **Бардовський Б. О.** Сучасні тенденції використання полімерних гнучких матеріалів як основи для друкованої електроніки. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. *Здобувачем проведено аналіз сучасних тенденцій використання гнучких полімерних і паперових матеріалів як основи для друкованої електроніки.*

11. **Бардовський Б. О.** Застосування рядів Фур'є в описі поверхні основ. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. *Здобувачем представлено методологію кількісної оцінки морфології поверхні паперу шляхом апроксимації профілограм за допомогою рядів Фур'є.*

12. **Bardovskyi B.** “Possibilities of printed electronics on paper in a crisis period”, Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті» (Київ, 08–09 грудня 2023 року). / упор. В. Шпак; за загальною редакцією С. Табачнікова. Київ : ДП «Експрес-об'ява», 2023. 169 – 174. *Здобувачем проведено комплексний аналіз сучасних технологій нанесення функціональних шарів, включно з друкарськими методами формування елементів електронних схем; обґрунтовано доцільність використання паперу як доступної та екологічної основи в умовах кризових періодів, а також систематизовано вимоги до властивостей матеріалів і основ, що забезпечують стабільність виготовлення пристроїв друкованої електроніки.*

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ I СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ПАПЕРОВИХ ОСНОВАХ	32
1.1 Аналітичний огляд сучасного стану процесів створення друкованої електроніки	32
1.1.1 Аналіз технологій створення друкованої електроніки	33
1.1.2 Аналіз основ для створення виробів друкованої електроніки	40
1.1.3 Аналіз матеріалів фарб для друкованої електроніки	43
1.2 Теоретичні дослідження поверхні основи	46
1.3 Експериментальні методи дослідження	49
1.3.1 Методи дослідження поверхні	49
1.3.2 Методи дослідження адгезії	50
1.4 Технологічний процес створення елементів електроніки на папері, які виготовляються способами друку	51
1.5 Основні класи пристроїв друкованої електроніки та напрями застосування	53
1.6 Патентний пошук за тематикою	55
1.7 Висновки до першого розділу і постановка завдань дослідження	58
РОЗДІЛ II МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	61
2.1 Вибір зразків для проведення експериментальних досліджень	61
2.2 Удосконалена методика проведення обробки поверхні паперу	61
2.3 Метод нанесення струмопровідних доріжок	63
2.3.1 Трафаретний друк	63
2.3.2 Порівняльне магнетронне напилення	66
2.4 Гравіметричний метод дослідження	68
2.5 Оптичні методи досліджень	69
2.5.1 Метод проведення оптичної мікроскопії	69
2.5.2 Метод проведення вимірювань кута змочування	70

2.6	Метод проведення профілометрії	71
2.6.1	Контактна профілометрія	71
2.6.2	Оптична профілометрія	72
2.7	Метод проведення вимірювань електрофізичних показників готового виробу	73
2.8	Методика імітації зношування виробів	74
2.9	Загальний алгоритм дослідження	78
2.10	Висновки до другого розділу	79

РОЗДІЛ III ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОВЕРХНІ ПАПЕРОВИХ ОСНОВ ТА ЯКОСТІ СТРУМОПРОВІДНИХ ШАРІВ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

		81
3.1	Дослідження електрофізичних властивостей струмопровідних доріжок	81
3.2	Дослідження стану поверхні основи та нанесеного матеріалу	89
3.3	Випробовування зразків в умовах штучного зношування	97
3.3.1	Термоциклювання	97
3.3.2	Механічне зношування	103
3.3.3	Імітація зношування із використанням забруднювальної речовини	106
3.4	Схема формування зношуваності виробу	108
3.4.1	Визначення зміни параметру опору струмопровідних доріжок у дослідницьких умовах	109
3.4.2	Встановлення механізмів зношування друкованих струмопровідних шарів	110
3.5	Висновки до третього розділу	112

РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ПІДГОТОВКИ ПАПЕРОВОЇ ОСНОВИ ДО НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ДОРІЖОК ТРАФАРЕТНИМ ДРУКОМ

		114
4.1	Математичний опис поверхні паперу методом фрактального аналізу	114
4.2	Визначення засобів забезпечення якості основи та кінцевого виробу	119

	21
4.3 Дослідження якості нанесення схем струмопровідних доріжок	126
4.3.1 Аналіз топографічного профілю поверхні паперової основи після коронної обробки методом профілометрії	126
4.3.2 Дослідження залежності параметрів коронування поверхні паперової основи та електрофізичних властивостей виробу	127
4.3.3 Дослідження якості нанесених струмопровідних доріжок після обробки коронним розрядом	134
4.4 Практичні рекомендації щодо удосконаленого технологічного процесу нанесення елементів друкованої електроніки	136
4.5 Висновки до четвертого розділу	139
ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	143
ДОДАТОК А	164
ДОДАТОК Б	170
ДОДАТОК В	175
ДОДАТОК Д ЛІСТИНГ КОДУ ПРОГРАМИ	181
ДОДАТОК Е ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ ОСНОВ	213
ДОДАТОК Ж РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ОПОРУ ПІСЛЯ ТЕРМОЦИКЛІВ	216
ДОДАТОК К МІКРОФОТОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ НАНЕСЕНОГО МАТЕРІАЛУ	218
ДОДАТОК Л ТРИВИМІРНІ МОДЕЛІ ПОВЕРХНІ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПАПЕРОВИХ ОСНОВ	219
ДОДАТОК М	221

ВСТУП

Актуальність теми. Друкована електроніка є одним із перспективних напрямів сучасного розвитку електронної промисловості, що спрямований на створення гнучких, легких електронних пристроїв. На відміну від традиційних методів виготовлення електроніки, заснованих на кремнієвих технологіях, друковані методи дають змогу наносити функціональні шари безпосередньо на різні основи, у тому числі полімерні, текстильні та паперові [1]. Перевагами цього підходу є зниження собівартості, можливість масштабованого рулонного виробництва (R2R) і швидкого прототипування електронних компонентів [1, 2].

Одним із ключових напрямів розвитку є використання целюлозних основ, які вирізняються низькою вартістю, біорозкладністю та екологічністю [1]. Папір як основа для друкованої електроніки має переваги з погляду стійкого виробництва, однак має низку технологічних обмежень, серед яких – шорсткість, пористість і гідрофільність, що призводить до зниження адгезії та стабільності провідних шарів [1]. Це обумовлює необхідність розроблення ефективних методів попередньої підготовки поверхні, які забезпечують підвищену енергію змочування та покращення умов закріплення струмопровідних фарб [3].

Серед таких методів використовується обробка коронним розрядом, що базується на взаємодії поверхні з іонізованим газом. Внаслідок цього на поверхні утворюються полярні функціональні групи, зростає мікрошорсткість і поверхнева енергія, що покращує змочуваність і адгезію фарб [1, 4]. Метод відзначається простотою реалізації, сумісністю з рулонними процесами, відсутністю потреби у вакуумному обладнанні та можливістю застосування до тонких і гігроскопічних основ, як-от папір [5–6].

Друкарські методи загалом розглядаються як базова технологічна платформа для виготовлення елементів друкованої електроніки завдяки адитивному характеру процесу, можливості масштабування та сумісності з різними функціональними фарбами і основами [1, 2, 7]. Вони забезпечують формування провідних, напівпровідникових і діелектричних елементів на гнучких та жорстких основах із контрольованою геометрією

та відносно низькими витратами матеріалів порівняно з традиційними вакуумними або фотолітографічними технологіями [2, 7]. Водночас якість і функціональні характеристики надрукованих елементів істотно залежать від властивостей основи та узгодженості параметрів друку, оскільки нерівномірність шару, дефекти структури та зростання питомого електричного опору можуть виникати за недостатньої адгезії або неоднорідної поверхні [2, 7]. Особливо це суттєво для виробів у жорстких умовах експлуатації, наприклад, струмопровідні доріжки здебільшого використовуються в інтелектуальному пакуванні [8–10].

Отже, дослідження, спрямовані на підвищення якості трафаретного друку провідних шарів на паперових основах шляхом їхньої попередньої обробки коронним розрядом, є актуальними як з наукового, так і з прикладного погляду. Отримані результати сприятимуть розвитку технологій гнучкої друкованої електроніки, оптимізації процесів формування провідних шарів і розширенню можливостей використання екологічних целюлозних основ у сфері високих технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано відповідно до тематичного напрямку наукових робіт кафедри технології поліграфічного виробництва, пов'язаних із удосконаленням процесів формування функціональних та захисних шарів друкарськими методами.

Робота безпосередньо узгоджується з темами ініціативних кафедральних науково-дослідних робіт «Технології забезпечення якості фарбових та функціональних шарів» – особистий внесок здобувача: дослідження впливу попередньої обробки паперових основ на параметри формування функціональних шарів за допомогою проведення експериментів з обробкою коронним розрядом, отримання та інтерпретація морфологічних даних, а також «Теоретико-методологічні засади забезпечення зносостійкості поліграфічної продукції – особистий внесок здобувача: дослідження зміни електрофізичних властивостей провідних шарів після механічних, хімічних та термічних впливів за допомогою проведення випробувань, вимірювання питомого опору до і після навантаження. У межах цих напрямів у дисертації розглянуто питання

підвищення адгезії, провідності та стабільності струмопровідних шарів, нанесених трафаретним друком на паперові основи, що відповідає проблематиці оптимізації властивостей функціональних покриттів та підвищення їхньої стійкості до експлуатаційних навантажень. Виконане дослідження є елементом комплексного наукового підходу до вдосконалення технологічних процесів формування друкованої електроніки, включно з аналізом поверхневих параметрів паперу, впливу попередньої обробки коронним розрядом та оцінюванням зносостійкості провідних доріжок, що узгоджується з науковими планами кафедри технології поліграфічного виробництва.

Об'єкт дослідження – технологічний процес трафаретного друку струмопровідних доріжок на паперових основах, процес поверхневої обробки паперових основ.

Предмет дослідження – взаємозв'язок поверхневих параметрів паперових основ, технологічних параметрів попередньої обробки поверхні паперової основи, друкування струмопровідних доріжок, їхнього післядрукарського оброблення з параметрами якості задруковуваних основ та друкованих струмопровідних шарів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення технологічного процесу друкування провідних шарів трафаретним друком з урахуванням поверхневих властивостей паперових основ. Реалізація поставленої мети буде досягнута підвищенням стабільності електричних характеристик, покращенням адгезії та забезпеченням відтворюваності процесів друку у виробництві гнучкої електроніки, зокрема для елементів функціонального пакування, інтерактивних поліграфічних виробів, форзаців, вкладок, етикеток та інших паперових носіїв з інтегрованими елементами друкованої електроніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних технологічних процесів створення друкованої електроніки з використанням технологій поліграфічного виробництва порівняно з іншими методами, визначити можливі напрями застосування друкарських технологій, проблеми, що впливають на стабільність надрукованих струмопровідних шарів, а також

способи вирішення за допомогою застосування друкарських технологій і забезпечення якості елементів друкованої електроніки.

2. Сформуванати методику експериментальних досліджень, а саме нанесення струмопровідних шарів, попередньої обробки, морфологічних властивостей поверхні основи, зносостійкості та термічної стійкості, обрати матеріали, методи й устаткування, обґрунтувати засоби та визначити режими підготовки целюлозних основ, технологічного процесу трафаретного друку та можливої післядрукарської обробки. Провести порівняльний аналіз показників якості струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими засобами, з аналогами, виготовленими іншими методами.

3. Теоретично та експериментально визначити вплив параметрів обробки поверхні традиційними засобами поліграфічного виробництва (зокрема коронним розрядом) на параметри паперових основ (морфологію, шорсткість і поверхневу енергію тощо) та встановити технологічні режими обробки, які забезпечують найвищі друкарсько-технічні властивості під час нанесення фарбових струмопровідних шарів.

4. Встановити взаємозв'язок показників якості струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими методами, та режимів попередньої обробки основи, геометричних параметрів друкованих ліній, режимів післядрукарської обробки. Провести порівняльний аналіз параметрів якості досліджуваних зразків, отриманих друкарськими і недрукарськими методами.

5. Провести теоретичний аналіз можливих впливів на зразки під час їхньої експлуатації, розробити методику імітації експлуатаційних факторів (механічних, хімічних та термічних навантажень) та експериментально визначити вплив штучного зношування на стабільність показників якості друкованих провідних шарів (питомого опору та цілісності), надрукованих на різних типах паперових основ.

6. Розв'язати багатокритеріальну задачу вибору параметрів обробки паперової основи задля отримання якісних струмопровідних фарбових шарів, встановивши раціональні параметри обробки коронним розрядом, які забезпечують мінімальний

питомий опір, високу рівномірність нанесення та відтворюваність результатів трафаретного друку.

7. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розробити удосконалений технологічний процес нанесення струмопровідних шарів із застосуванням трафаретного друку та технологічні рекомендації щодо підготовки паперових основ для друкованої електроніки, орієнтовані на масштабоване використання у поліграфічному виробництві.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження, спрямованих на оцінювання впливу попередньої обробки коронним розрядом на морфологічні властивості паперових основ і якість формування провідних шарів друкованої електроніки.

Теоретичні методи ґрунтувалися на аналізуванні та оцінюванні зміни характеристик і морфології основи після коронної обробки. Використано метод фрактального аналізу для кількісного опису мікрорельєфу поверхні.

Експериментальні дослідження виконано на зразках глянцевого та матового паперу, попередньо оброблених коронним розрядом на різних рівнях потужності. Визначення поверхневої енергії здійснювалося за допомогою методу краєвого кута змочування, морфологію було досліджено профілометрично та за допомогою оптичної мікроскопії

Електричні властивості провідних доріжок із графенової пластизольної фарби, нанесеної трафаретним друком, досліджували шляхом вимірювання питомого опору на зразках за допомогою цифрового мультиметра. Для оцінювання стабільності після дії експлуатаційних факторів проведено серію механічних, хімічних і термічних випробувань, що імітують умови експлуатації.

Статистичну обробку експериментальних даних і перевірку достовірності результатів здійснено методами математичної статистики з використанням середньоквадратичного відхилення. Для оцінювання впливу параметрів обробки на результати друку застосовано багатфакторний аналіз.

Для визначення раціональних режимів коронної обробки використано метод аналізу ієрархій, що дозволив співвіднести вагові коефіцієнти впливу окремих параметрів (потужності, типу поверхні, ширини доріжки) на показники питомого опору та стабільності провідних шарів.

Так, дослідження базується на поєднанні теоретичних, морфологічних, електрофізичних і статистичних методів, що забезпечило достовірність висновків і можливість практичного використання результатів у процесах виробництва гнучкої друкованої електроніки.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- науково обґрунтовано раціональний технологічний процес нанесення елементів друкованої електроніки на паперових основах трафаретним друком на основі аналізу розроблених класифікацій способів нанесення, матеріалів основ, струмопровідних фарб та розробленої ієрархії факторів забезпечення якісних струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими методами, що дозволило *удосконалити* технологічний процес нанесення елементів друкованої електроніки на паперових основах із застосуванням трафаретного друку, де *вперше* комплексно, як цілісний процес, застосовано цілеспрямовану попередню обробку поверхні паперу коронним розрядом та термічну обробку у кліматичній камері, що забезпечило підвищення адгезійних властивостей та стабільності нанесених провідних шарів.

- експериментально встановлено взаємозв'язок режимів обробки коронним розрядом паперових основ різного виду, їхніх друкарсько-технічних властивостей (змочуваності, шорсткості тощо) та показників якості (електропровідність, стабільність питомого опору, цілісність тощо) струмопровідних доріжок на основі графенових фарбових композицій, нанесених трафаретним друком на паперових основах, що разом з обґрунтуванням раціонального режиму обробки, дозволяє забезпечити підвищення стабільності електричних характеристик друкованих провідних шарів.

- запропоновано новий підхід до кількісного визначення якості друкованих провідних шарів на паперових основах, який ґрунтується на запропонованому комплексному показнику якості, що формується як результат урахування низки показників якості (електропровідність, стабільність питомого опору, цілісність тощо) одразу після нанесення, а також після випробувань з імітацією впливу зовнішніх факторів, що забезпечує комплексну багатофакторну оцінку якості нанесених шарів.

- отримано комплекс експериментальних даних щодо зміни властивостей струмопровідних доріжок у результаті імітації зношування, а також встановлено кореляцію між технологічними режимами обробки шарів і зміною показників якості після імітації зношування, що дає змогу обґрунтувати вибір раціональних режимів обробки коронним розрядом, які підвищують комплексний показник якості.

- встановлено механізми формування зношеності друкованих струмопровідних шарів та виокремлено види пошкодження виробів з провідними доріжками на паперовій основі, що дозволило удосконалити методику дослідження експлуатаційних властивостей надрукованих провідних доріжок проведенням механічного стирання і термоциклування та дало змогу оцінити стабільність та довговічність сформованих провідних шарів.

Удосконалено:

- методологію визначення зносостійкості струмопровідних фарбових шарів, яка ґрунтується на комплексній оцінці якості з урахуванням імітації комплексної дії механічних, хімічних та термічних впливів на зміну електричного опору, що дає змогу підвищити точність оцінювання інтенсивності процесів деградації дозволяє встановити взаємозв'язок між мікрогеометрією основи та стабільністю струмопровідних фарбових шарів.

Набула подальшого розвитку:

- методологія оцінки стану поверхні паперових основ, яка базується на розрахунку фрактальної розмірності профілю за даними безконтактної профілометрії;

це дозволило вперше встановити числовий взаємозв'язок між параметрами обробки коронним розрядом та зміною геометричної складності мікрорельєфу основи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вдосконаленні технологічного процесу виготовлення друкованої електроніки на паперових основах, зокрема у впровадженні попередньої обробки коронним розрядом та пост-обробки у кліматичній камері. Це дозволяє знизити опір струмопровідних доріжок, підвищити їхню адгезію та забезпечити стабільність функціонування електронних компонентів під впливом зовнішніх факторів. Розроблено практичні рекомендації щодо промислового застосування паперових основ у виробництві друкованої електроніки, які включають раціональні режими попередньої обробки коронним розрядом та параметри термоциклової пост-обробки. Впровадження цих рекомендацій дозволяє виробникам використовувати папір як вигідну альтернативу традиційним основам, забезпечуючи необхідні функціональні характеристики електронних компонентів.

Визначені раціональні режими обробки поверхні (3000 Вт) дозволили сформулювати рекомендації для промислового використання паперових основ як екологічно чистих носіїв у друкованій електроніці. Запропонований підхід забезпечує можливість зменшення вартості виробництва функціональних елементів та розширення сфер застосування паперових основ у гнучкій електроніці, сенсоріці, RFID-мітках та пристроях енергозбереження.

Результати досліджень впроваджено у навчальний процес НН ВПІ під час проведення лекційних, лабораторних і практичних занять з навчальних дисциплін «Технології захисту друкованої продукції», «Теоретичні та практичні основи забезпечення зносостійкості у видавництві та поліграфії» та «Теоретичні та практичні засади досліджень спеціалізованих видів паперу». Ці впровадження підтверджено відповідними документами.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаною науковою працею. Усі представлені наукові результати, експериментальні дані, графічні матеріали та інтерпретація отриманих залежностей належать особисто здобувачеві.

До дисертаційної роботи включено лише ті результати з наукових публікацій, підготовлених у співавторстві, які становлять індивідуальний внесок автора. Здобувачем особисто сформульовано наукову проблему, визначено мету та завдання дослідження, розроблено програму експериментів, проведено випробування зразків паперу, оброблених коронним розрядом, а також нанесення та тестування провідних шарів графенової фарби методом трафаретного друку.

Автором самостійно здійснено аналіз мікрорельєфу за допомогою профілометрії та оптичної мікроскопії, а також обробку результатів із використанням методу математичної статистики.

Здобувачем підготовлено експериментальні зразки, проведено серії механічних, термічних та хімічних випробувань, визначено закономірності впливу параметрів коронної обробки на провідність та стабільність друкованих доріжок. Співавтори наукових праць брали участь у консультаціях щодо постановки експерименту та інтерпретації частини результатів, однак основні етапи виконано здобувачем особисто.

У наукових роботах зі співавторами здобувачем: проаналізовано технологію постобробки елементів друкованої електроніки, що нанесені на папір, шляхом обробки в кліматичній камері, та їхній вплив на опір [6], проаналізовано технологію попередньої обробки коронним розрядом та визначено раціональні режими на базі морфологічних параметрів поверхні та електрофізичних параметрів струмопровідних доріжок [11–13], проведено аналіз сучасних технологій нанесення інформації, включно з друкарськими методами, зокрема для нанесення елементів друкованої електроніки, проведено аналіз основ та матеріалів для нанесення [11, 14, 15–18], досліджено і проаналізовано результати впливу імітації зношення на зразки із нанесеними елементами друкованої електроніки [19], а також представлено використання методології кількісної оцінки морфології поверхні паперу, а саме профілю [20, 21].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 8 конференціях: VI Міжнародна наук.-практ. Конф. «Кваліологія книги», 2025, 25 Міжнародна наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» 2025,

Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: X Міжнародна наук.-техн. конф 2025, Proc. SPIE, Seventeenth International Conference on Correlation Optics 2025, Sixteenth International Conference on Correlation Optics 2024, 24 Міжнародна наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» 2024, 23 Міжнародна наук.-техн. конф. «Друкарство молоде», 2023, Міжнародна наук.-практ. Конф. «Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті» 2023, а отримані результати оформлені тезами матеріалів конференцій.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць: 1 публікація у періодичному виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus; 3 публікації у наукових фахових виданнях категорії Б, 2 публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій, проіндексованих у базі даних Scopus, 6 публікацій у матеріалах і тезах міжнародних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 181 найменування та 7 додатків. Загальний обсяг роботи – 222 сторінок, 121 з яких – основний текст. У дисертації 57 рисунків та 30 таблиць.

РОЗДІЛ I

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ПАПЕРОВИХ ОСНОВАХ

1.1 Аналітичний огляд сучасного стану процесів створення друкованої електроніки

Друкована електроніка – це технологія, яка швидко розвивається, і революціонує спосіб виробництва електронних пристроїв. Це процес друку електронних пристроїв на різних основах за допомогою струмопровідних чорнил, який є економічно ефективним і дозволяє виготовляти електронні пристрої різних масштабів. Останніми роками друкована електроніка привернула велику увагу завдяки широкому спектру її застосування, включно з охороною здоров'я [2, 22], транспортом [2], енергетикою [7] та багатьма іншими сферами [2, 7, 22–23]. Потенціал друкованої електроніки величезний, і очікується, що вона зробить революцію в електронній промисловості: методи друку сприяють і революціонізують розвиток гнучких датчиків і електроніки, забезпечуючи економічно ефективні способи обробки різноманітних електронних матеріалів за температур, сумісних із пластиковими основами [24]. Причини застосування технологій друкування в процесі створення елементів електроніки, а також паперу як основи такі:

- зростає попит на гнучку електроніку в пристроях, що носяться, розумному текстилі та додатках Інтернету речей (IoT) завдяки їхній легкій та гнучкій природі. Гнучкі дисплеї та смартфони, що згинаються, стимулюють інтерес та інвестиції в цю галузь [2,7, 22–24];

- паперові основи біологічно розкладаються і придатні для вторинної переробки, що відповідає світовим тенденціям до стійких та екологічно чистих технологій. Використання паперових основ потенційно може зменшити кількість електронних відходів, сприяючи розвитку економіки рециклінгу [2];

- гнучка електроніка може згинатися, складатися і розтягуватися, що робить її придатною для застосувань, де традиційна жорстка електроніка не може бути використана [25–26];

- також варто зазначити, що постійні дослідження сприяють вдосконаленню електрофізичних параметрів виробів [22, 27–28], технології друку є дешевшими, ніж традиційні технології [29–31], у друкарських процесах менший відсоток відходів [32], друкowana електроніка дозволяє швидко створювати прототипи [26, 33].

Друкowana електроніка – це тип технології, яка дозволяє друкувати електронні схеми, датчики та інші компоненти на різних основах, як-от пластик [2], папір [2] або навіть тканина [34], використовуючи такі методи друку, як струминний [2] або трафаретний [22]. Цей метод виробництва електронних пристроїв має багато переваг перед традиційними методами, включно з нижчою вартістю, швидшим виробництвом та можливістю створювати індивідуальні конструкції [35].

1.1.1 Аналіз технологій створення друкowanej електроніки

Серед основних технологій створення друкowanej електроніки виділяють (рис. 1.1):

- трафаретний друк – один із найпоширеніших методів завдяки простоті, низькій вартості та здатності наносити товсті шари пасти. Активно використовується для друку провідних доріжок, антен, сонячних елементів та RFID-міток [30, 31];

- струминний друк – дозволяє точно наносити мікрокраплі функціонального матеріалу безконтактним способом. Перевага – висока роздільна здатність та можливість швидкого прототипування без виготовлення форм [2, 32, 34, 36, 37];

- флексографія – ротаційний метод із використанням гнучких форм. Підходить для високошвидкісного друку на рулонних матеріалах і застосовується в масовому виробництві сенсорних панелей або упаковки з інтегрованими функціями [30];

– глибокий друк – забезпечує рівномірне нанесення тонких шарів на великі площі. Вимагає точного контролю в'язкості фарби, часто використовується для нанесення органічних транзисторів [30, 38];

– інші спеціальні види друку, які застосовуються у галузі друкованої електроніки: аерозольний струминний друк [3, 25], наноімпринтинг [26], тамподрук [2], електрогідродинамічний друк [39].

За тенденціями останніх років сегмент технологій трафаретного друку домінував на світовому ринку в 2021 році і становив максимальну частку - понад 64% від загального доходу (рис. 1.1). Очікується, що сегмент продовжить домінувати на світовому ринку протягом прогнозованого періоду до 2030 року [1].

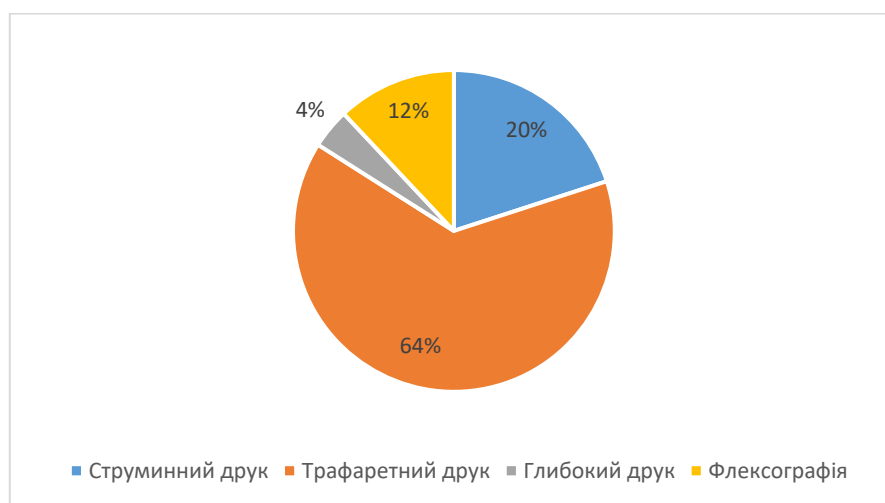


Рис. 1.1. Частка ринку способів друку для друкованої електроніки [1]

Традиційними методами нанесення струмопровідних доріжок є фізичне осадження з парової фази, хімічне осадження з парової фази, гальванізація, магнетронне напилення [27, 40].

Одними з методів фізичного осадження з парової фази є термічне випаровування та магнетронне розпилення – матеріал безпосередньо осаджується з джерела на всю поверхню основи [28, 41]. Інший метод напилення – електро-променево випаровування [42]. Хімічне осадження з парової фази передбачає утворення матеріалу безпосередньо

на основі внаслідок хімічної реакції газових прекурсорів, що забезпечує однорідне покриття [40]. Підтипи – плазмово-хімічне осадження з газової фази [43], атомно-шарове осадження [44]. При гальванізації матеріал осаджується на провідній основі шляхом пропускання струму через електроліт, що забезпечує товсті металеві шари [27].

Для створення тонких плівок використовується технологія PVD, яка широко застосовується у виробництві електронних компонентів [45, 46].

Магнетронне напилення широко застосовується для формування струмопровідних шарів і доріжок завдяки можливості отримання щільних, рівномірних та електропровідних тонких плівок із контрольованими властивостями [47]. Осадження функціональних покриттів методом магнетронного напилення постійним струмом також використовується для формування електропровідних доріжок [48, 49]. Оглядом дослідження з тонкоплівкових доріжок підтверджують, що магнетронне напилення залишається базовим методом формування металевих провідних елементів завдяки поєднанню високої якості плівок та технологічної відтворюваності [50].

Методи, які застосовуються при нанесенні струмопровідних доріжок було узагальнено у вигляді класифікації на рис. 1.2 [2, 22, 34, 38, 39].

Кожен із цих методів друку має свої переваги й обмеження, а вибір залежить від конкретного виробу та вимог.

Застосування традиційних методів формування елементів електроніки в гнучких і велико-площинних пристроях супроводжується низкою обмежень, пов'язаних із матеріалами та технологіями виготовлення [51]. Високопродуктивні неорганічні матеріали, навпаки, потребують складних тонкоплівкових технологій формування багат шарових структур, що ускладнює масштабування на великі площі та інтеграцію з гнучкими основами [51, 52]. Як зазначається в оглядових роботах, такі підходи, запозичені з класичної мікроелектроніки, є малосумісними з вимогами носимої та гнучкої електроніки, що зумовлює пошук альтернативних технологій виготовлення [53].

Друкарські методи виготовлення електронних елементів розглядаються як ефективна альтернатива традиційним технологіям завдяки поєднанню технологічної

простоти, знижених витрат і розширеної сумісності з різними типами основ [54]. Узагальнення сучасних досліджень у сфері друкованих джерел живлення також вказує на те, що друкарські технології забезпечують спрощену інтеграцію функціональних матеріалів і компонентів у гнучкі та велико-площинні електронні системи без застосування вакуумного обладнання та складних багатостадійних процесів [55]. Порівняльний аналіз високопродуктивних методів осадження тонких плівок показує, що друкарські технології, зокрема трафаретний, струминний і глибокий друк, вирізняються відкритим атмосферним виконанням процесу, помірними температурними режимами та потенціалом масштабування до рулонних ліній, що знижує експлуатаційні витрати порівняно з вакуумними методами осадження [56].

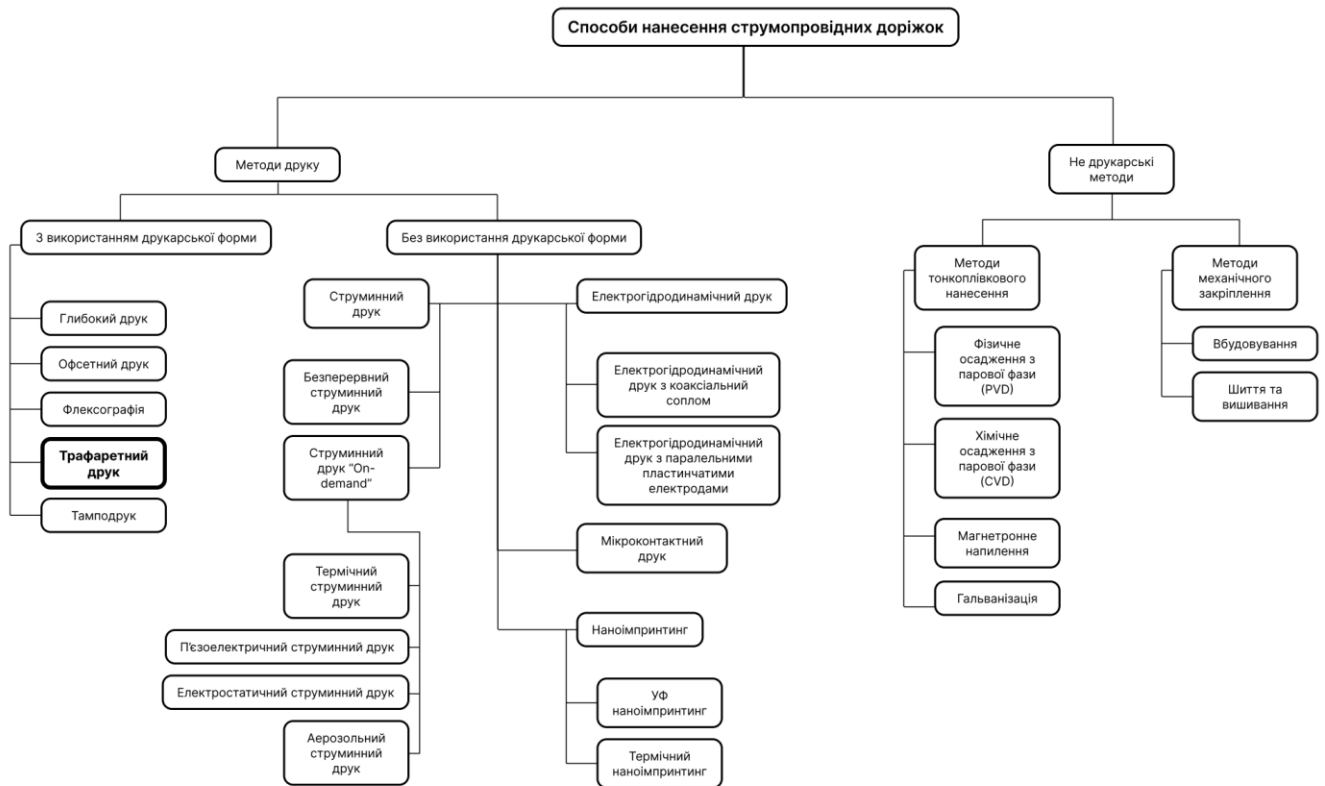


Рис. 1.2. Способи нанесення елементів електроніки [14]

Спільною проблематикою застосування друкарських методів у електроніці є підвищені вимоги до параметрів поверхні основи, оскільки рівномірність шару, адгезія

та точність формування елементів істотно залежать від шорсткості, пористості та енергії змочування поверхні [57, 58]. Для методів струминного та аерозольного друку головними факторами є однорідність мікрорельєфу та контроль змочування, які визначають стабільність краплі, характер її розтікання та точність формування провідних доріжок [57]. Водночас для трафаретного друку головну роль відіграє мікрошорсткість і пористість основи, які сприяють механічному закріпленню пастоподібних фарб і забезпечують достатню адгезію друкованого шару до основи [58].

Порівняльний аналіз проведено на основі 5 ключових критеріїв за п'ятибальною шкалою (табл. 1.1). Кожен критерій оцінює практичну придатність технології для виробництва гнучкої електроніки на паперовій основі: механічна стійкість; масштабованість; сумісність з папером; собівартість та складність обладнання.

Таблиця 1.1. Сумарна (інтегральна безвагова) оцінка на основі бальної експертної шкали

Технології/ Критерій оцінювання	Собівартість процесу [57]	Масштабо- ваність [53, 57]	Сумісність з паперовими основами [54, 55, 59-62]	Механічна стійкість [52]	Технологічна складність та капітальні вимоги [55-57]
Трафаретний друк	5	4	5	5	5
Струминний друк	3	3	3	3	3
Магнетронне напилення (PVD)	1	2	1	1	1

Сумарний бал:

- трафаретний друк: 24/25;
- струминний друк: 15/25;
- магнетронне напилення: 6/25.

Трафаретний друк є доцільним методом формування струмопровідних доріжок у друкованій електроніці завдяки поєднанню технологічної простоти, адитивного характеру процесу та здатності наносити відносно товсті шари пастоподібних провідних матеріалів. На відміну від струминного друку, трафаретний метод допускає використання високов'язких композицій з підвищеним вмістом твердої фази [58, 63].

Практична ефективність трафаретного друку також підтверджується застосуванням надрукованих електродів у функціональних біосенсорних системах [64]. На відміну від традиційних тонкоплівкових технологій, трафаретний друк не потребує вакуумного обладнання, дорогих мішеней і високих температур процесу, що робить його сумісним із термочутливими та екологічними целюлозними основами і знижує загальну собівартість виробництва [62, 63]. Адитивний характер трафаретного друку також забезпечує менші втрати матеріалу та кращу інтеграцію в рулонні виробничі лінії [62].

Загальний опис послідовності технологічного процесу трафаретного друку струмопровідних доріжок:

1. Підготовка функціональної пасти (чорнила): процес трафаретного друку починається з формування в'язкої пастоподібної композиції, що містить функціональний, розчинник та полімерний зв'язувальний компонент [62, 65].

2. Виготовлення та підготовка трафарету: трафарет формується як маска з визначеними отворами, що відповідають геометрії друкованих елементів. У класичному варіанті використовуються сітчасті трафарети з фотополімерною емульсією, тоді як для високороздільного друку можуть застосовуватися суцільні трафарети, наприклад на основі тонких кремнієвих пластин, виготовлених методами фотолітографії та травлення [65].

3. Позиціонування основи та трафарету: основа фіксується на робочій поверхні, після чого трафарет розміщується над нею з контрольованим зазором або в безпосередньому контакті. Якість контакту між трафаретом і основою визначає чіткість меж друкованих елементів та рівномірність перенесення пасти [65].

4. Перенесення пасти через трафарет: функціональна паста наноситься на поверхню трафарету та продавлюється крізь його отвори за допомогою ракеля. Під час руху ракеля паста проходить стадії заповнення отворів, контакту з основою, адгезії та відділення трафарету, внаслідок чого формується заданий рисунок на поверхні основи [62, 65].

5. Видалення трафарету та формування шару: після проходження ракеля трафарет відокремлюється від основи, залишаючи на її поверхні друкований шар пасти. Геометрія та товщина шару залежать від властивостей пасти, параметрів друку та характеристик трафарету [62].

6. Післяобробка друкованих елементів: завершальним етапом є термічна або інша обробка, спрямована на видалення розчинника та полімерного зв'язувального компонента і формування безперервної функціональної структури. Для провідних матеріалів післяобробка забезпечує зростання електропровідності за рахунок ущільнення та покращення контактів між частинками функціонального матеріалу [62, 63].

Джерела підкреслюють, що саме контроль реологічних властивостей пасти, якості трафарету та параметрів перенесення матеріалу визначають роздільну здатність, товщину шару та функціональні характеристики друкованих елементів, що робить трафаретний друк придатним для виготовлення провідних структур у гнучкій та друкованій електроніці [62, 63, 65].

Загалом устаткування для трафаретного друку в друкованій електроніці базується на тому ж принципі, що й традиційне трафаретне друкарське обладнання [66]. До спільних елементів належать використання плоских або напів-автоматичних систем, трафаретів (сітчастих або суцільних), ракеля як основного інструмента перенесення матеріалу [67]. Водночас у джерелах підкреслено, що у випадку друкованої електроніки обладнання має враховувати низку специфічних вимог, зокрема підвищений контроль тиску та швидкості ракеля, стабільність позиціювання основи, а також можливість роботи з функціональними пастами з високою в'язкістю та значним вмістом твердих частинок [68]. Окрім того, у низці робіт показано застосування модифікованих або персоналізованих трафаретів [66–68]. Так, практична реалізація визначається додатковими вимогами до точності, стабільності та сумісності з електронними матеріалами і процесами [67–68].

1.1.2 Аналіз основ для створення виробів друкованої електроніки

У традиційних методах виготовлення елементів електроніки як матеріали для основ використовують скло [69], кремній [70], керамічні основи [71] і металеву фольгу [26]. Гнучкі основи, включно з папером [2], поліетилентерефталатом і поліімідом [36], використовують як в традиційних методах так і друкованій електроніці.

Більш розповсюдженими є основи на базі пластику. Проте пластикові основи повинні мати такі властивості, як прозорість, стабільність розмірів, термічну стабільність, бар'єр, стійкість до розчинників, низький коефіцієнт теплового розширення та гладку поверхню [72]. Основні матеріали на базі пластику, що використовують як основу:

- поліетилентерефталат [36];
- поліфетиленафталат [73];
- полівініл хлорид [74];
- поліуретан [2];
- полідиметилсилоксан [2];
- інші (поліімід [36], полікарбонат [67], поліетилен [2] та ін).

Шаблони, надруковані на пластикових основах, зберігають високу електропровідність навіть після серйозних циклів згинання. Провідність шаблонів досягається після термічного відновлення [36].

Папір як основа загалом використовується при застосуванні струминного друку для створення бездротових пристроїв [22, 23]. Деякі методи передбачають покриття паперу полімерним матеріалом. Цей проміжний шар дозволяє створити товстий, компактний і щільний шар із покращеними електричними характеристиками та властивостями адгезії, більш стабільну і відтворювану реакцію під час деформації та напруги згину [75].

Дослідження поверхонь основ для друкованої електроніки показали [2], що покриття паперу відповідними полімерними матеріалами дозволяє створювати щільні та стабільні шари з покращеними електричними й адгезійними властивостями, що

забезпечує надійність навіть при деформації та згині. Окрім того, пористість, притаманну паперовим основам, можна використовувати для покращення інфільтрації та адгезії чорнила / фарби, сприяючи покращенню продуктивності. Приклади таких паперових матеріалів, як синтетичний папір Teslin [22], безкислотний копіювальний папір з лужним резервом (Cartiere Miliani Fabriano) [75], папір PEL P60 від Printed Electronics [32], спеціальний папір для друкованої електроніки виробництва Xerox (Gyricon) [76], фотопапір типу 3 виробництва Felix Schoeller (FS3) [77], демонструють універсальність і потенціал цієї основи.

Так, наприклад, у патенті «Support for Electronic Circuits» визначено певні вимоги до паперових основ, які можна використовувати для друку. Паперова основа для друку електронних схем струмопровідними чорнилами має такі ключові характеристики [78]:

- мікропористий шар: основа складається з основного матеріалу, доповненого мікропористим шаром. Цей мікропористий шар має пори із середнім розміром менше 100 нанометрів;
- оптимальний розмір пор: середній розмір пор у мікропористому шарі зазвичай знаходиться в діапазоні від 5 до 50 нанометрів;
- шорсткість поверхні: мікропористий шар тонко сконструйований, з шорсткістю поверхні менше 1 мкм, що оцінюється параметром Rz відповідно до стандарту DIN 4768.

Ці характеристики основи дозволяють виготовляти електропровідні структури за допомогою технології струминного друку, що дає змогу створювати високопродуктивні друковані схеми.

Гібридні паперові основи створюються за допомогою поєднання паперу з іншими матеріалами, як-от полімери або наночастинки, для покращення їхніх властивостей для друкованих електронних пристроїв. Гібридні паперові основи мають унікальне поєднання властивостей, включно з гнучкістю, легкістю і можливістю друку. Морфологічні властивості гібридних паперових основ залежать від конкретної комбінації використовуваних матеріалів [30].

Виокремлюють різні методи інтеграції жорстких мікроелектронних компонентів у текстиль, включно з фізичними, механічними та хімічними підходами і три рівні інтеграції: адаптований до текстилю, інтегрований у текстиль та на основі текстилю. Однак електронний інтегрований текстиль та елементи адаптовані до текстилю, не продемонстрували високі показники гнучкості і можливості прання під час проведених досліджень. Також виокремлюють появу нового методу інтеграції на основі текстилю, який має такі переваги, як гнучкість і можливість прання [79]. Основні матеріали – бавовна, шовк, льон [80].

Загалом, за результатом аналізу галузі, основні положення щодо матеріалу основ було узагальнено за допомогою відповідної класифікація (рис. 1.3) [3, 7, 22, 27, 34].

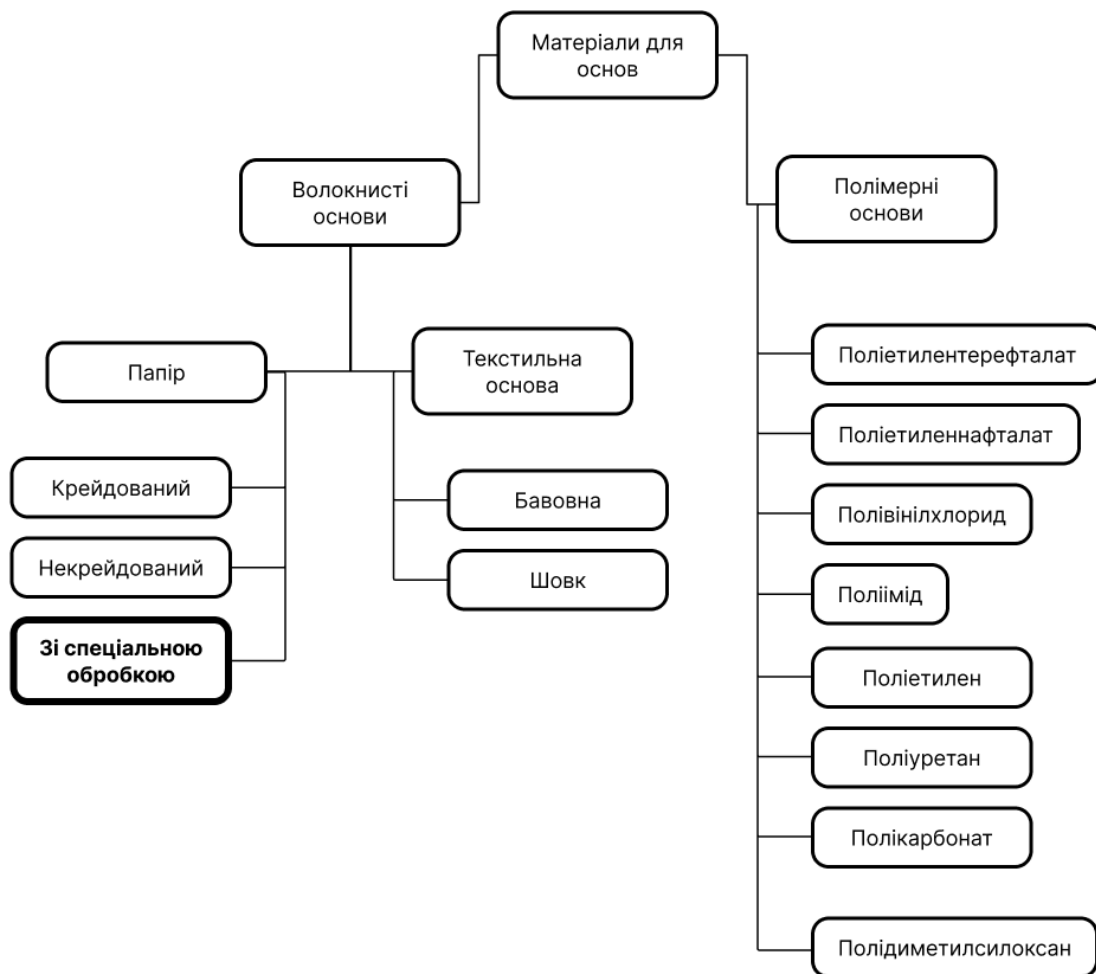


Рис. 1.3. Класифікація основ для друкованої електроніки [14]

Основи для друкованої електроніки доцільно класифікувати за структурною організацією матеріалу на волокнисті та полімерні, оскільки саме ця ознака визначає їх змочуваність, адгезійні властивості в процесі друку. В ході аналізу було визначено, що особлива увага приділяється паперу зі спеціальною обробкою, що покращує морфологічні властивості паперу.

1.1.3 Аналіз матеріалів фарб для друкованої електроніки

Зазначимо, що в західній науково-технічній літературі для позначення друкувальних матеріалів переважно використовується термін «*inks*», який у перекладі означає «чорнила». Водночас, для більшості методів друку доцільно використовувати термін «фарби», тоді «чорнила» є релевантним здебільшого для матеріалів, застосовуваних у струминному друці.

Друкарські фарби відіграють важливу роль у технологіях друкованої електроніки, забезпечуючи можливість формування електронних компонентів і пристроїв за допомогою прецизійного нанесення шаблонів функціональних матеріалів. Вибір відповідного складу фарб має суттєве значення для досягнення заданих електричних, механічних і оптичних характеристик друкованих структур. До складу таких матеріалів можуть входити металеві наночастинки, вуглецеві наноматеріали, діелектричні сполуки та ізоляційні полімери [2, 22].

До основних типів матеріалів, що застосовуються у складі струмопровідних фарб для друкованої електроніки, належать: струмопровідні композиції на основі металів [22, 34]; вуглецевмісні струмопровідні системи [2]; провідні полімери [75].

Метали є найпоширенішими провідниковими матеріалами, які застосовуються у складі друкувальних фарб завдяки високій електропровідності. Серед найбільш вживаних металів – срібло, мідь, золото та нікель.

Срібло забезпечує найвищу електропровідність серед поширених металів, а також характеризується стабільністю та надійністю в експлуатації. Основними обмеженнями

його використання є висока вартість. Застосовується переважно в антенах RFID, друкованих платах і струмопровідних доріжках [22, 34, 73].

Мідь характеризується високою електропровідністю та нижчою вартістю порівняно зі сріблом. Основним недоліком є її схильність до окиснення, що обумовлює необхідність використання захисних покриттів. Сфера застосування включає антени RFID, друковані плати та струмопровідні доріжки [22].

Золото характеризується високою електропровідністю та стійкістю до корозії, що робить його придатним для застосування в умовах агресивного середовища. Через високу вартість використовується переважно у високотехнологічній електроніці та біомедичних системах [22, 79].

Нікель має помірну електропровідність і нижчу вартість порівняно з іншими провідниковими металами. Водночас забезпечений рівень провідності є найнижчим серед поширених металів, а матеріал схильний до окиснення. Основними напрямками застосування є виробництво антен RFID та екранів для захисту від електромагнітних завад [32].

Вуглецеві матеріали характеризуються прийнятним співвідношенням вартості та функціональних властивостей, що обумовлює їх придатність для широкого спектра застосувань у друкованій електроніці. До найпоширеніших представників цього класу належать графен та вуглецеві нанотрубки [2, 41, 81].

Графен: має високу провідність, достатню механічну міцність, придатний для гнучких застосувань. Але через відносну новизну технології має високу вартість [80]. Основні варіанти застосувань – гнучка електроніка, сенсори, прозорі провідні плівки.

Вуглецеві нанотрубки (CNT) розглядаються як високопотенційні матеріали для створення провідних покриттів у гнучкій і розтяжній електроніці, зважаючи на їхню здатність формувати електропровідні мережі при низьких навантаженнях, забезпечуючи провідність навіть під час значних деформацій матеріалу [2]. Вони можуть бути інтегровані у різні технології нанесення, зокрема методи розпилення, фільтрації та друку, що дозволяє створювати струмопровідні покриття на полімерних або

текстильних основах без пошкодження основи [81]. CNT забезпечують задовільну провідність завдяки утворенню перколяційних шляхів при низьких концентраціях наноматеріалу і мають високу гнучкість, що зберігається після багаторазових циклів згинання [80]. Їхня сумісність із сучасними друкованими технологіями підтверджується даними, згідно з якими CNT активно використовуються в електропровідних пастах та покриттях для формування функціональних шарів в електронних пристроях [2].

Провідні полімери – це органічні матеріали, які проводять електрику, придатні до гнучких застосувань та обробки. Поширені провідні полімери: полі(3,4-етилендіокситіофен) [75], поліанілін [82], поліпірол [83].

Різні основи для чорнила застосовуються згідно з вимогами до функцій виробу. Основи для чорнила, що зазвичай використовуються для друкованої електроніки, узагальнені в класифікації на рис. 1.4.

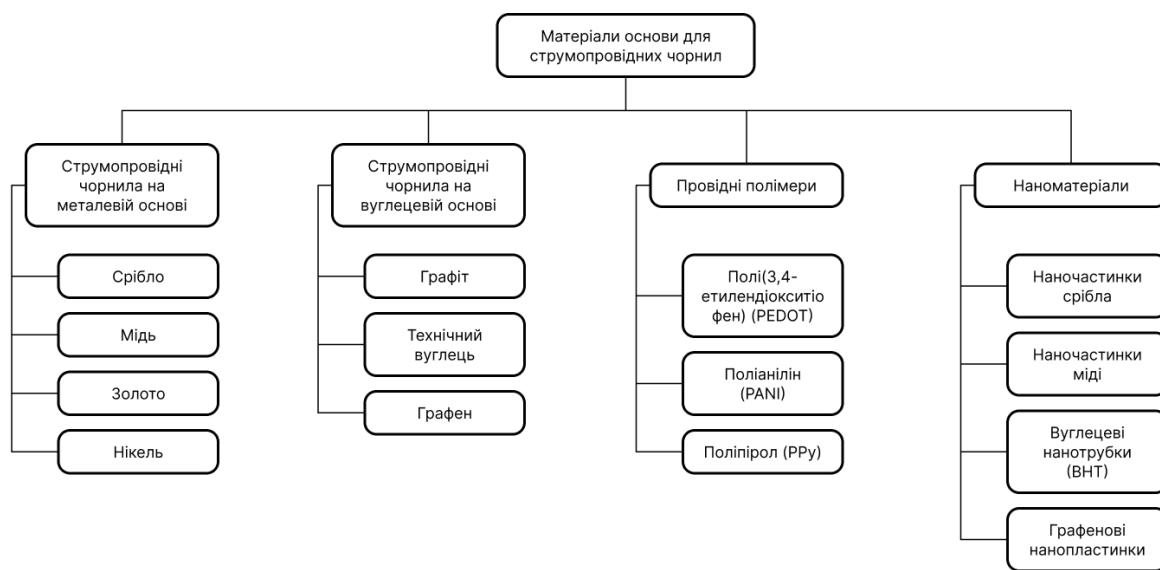


Рис. 1.4. Матеріали основи для струмопровідних фарб [14]

Основну увагу приділено чорнилам на графеновій основі, оскільки вони набули широкого застосування при невеликій вартості, що було зазначено в огляді вище.

1.2 Теоретичні дослідження поверхні основи

Для кількісного аналізу мікрогеометрії поверхні паперових основ використовують низку математичних методів, які дають змогу описати її шорсткість, ступінь впорядкованості та характер просторової структури. Найбільш поширені підходи:

- методи зі стандартів базуються на розрахунку таких параметрів шорсткості як середня арифметична висота профілю R_a , максимальна висота нерівностей R_z , середнє відхилення профілю R_q та опорна довжина профілю t_p [84];

- кореляційний аналіз використовують для оцінювання просторової взаємозалежності точок мікропрофілю. Автокореляційна функція описує, як швидко зникає подібність між висотними значеннями профілю при збільшенні відстані між точками, що дозволяє визначити характерну довжину хвилі нерівностей [85];

- спектральна густина потужності (PSD) є узагальненням кореляційного методу та дозволяє оцінювати частотний розподіл енергії нерівностей поверхні. На її основі визначають частоти, які вносять найбільший внесок у формування шорсткості, що робить метод особливо інформативним для аналізу технологічних поверхонь, отриманих механічною або плазмовою обробкою [86].

- метод рядів Фур'є забезпечує спектральне представлення профілю поверхні, розкладаючи його на суму гармонічних складових з різними амплітудами та частотами. Це дає змогу кількісно оцінити частотну структуру рельєфу та виявити переважаючі просторові гармоніки, що відповідають певним масштабам нерівностей [87–88];

- вейвлет-аналіз застосовується для одночасного вивчення просторових та частотних характеристик поверхні. На відміну від класичного Фур'є-аналізу, який оперує лише гармонічними складовими, вейвлет-перетворення дозволяє локалізувати особливості профілю на різних масштабах, виявляючи перехідні зони та аномальні ділянки [89];

- фрактальний аналіз ґрунтується на вивченні властивості самоподібності та масштабної інваріантності поверхні. Фрактальна розмірність відображає складність мікроструктури та є інтегральним параметром, що узагальнює статистичні й просторові

характеристики рельєфу. Така методологія вже була успішно застосована нами для аналізу поверхні з водяними знаками. Можливе масштабування на широкий спектр розмірності вимірювання профілю [20].

У попередніх дослідженнях поверхні паперових основ уже було розглянуто можливості застосування спектральних методів аналізу, зокрема представлення профілю поверхні у вигляді рядів Фур'є, що дозволяє кількісно описувати періодичні складові мікрорельєфу та порівнювати поверхні різних типів паперу за амплітудними характеристиками [21]. Водночас, фрактальний аналіз було безпосередньо застосовано для кількісної оцінки складності та неоднорідності поверхні паперу, зокрема і з використанням даних механічної контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії, що підтвердило його придатність для опису мікро- та наноструктури паперових основ [90].

Із метою адаптації методу рядів Фур'є до завдань аналізу поверхні паперу застосовується кубічна сплайн-інтерполяція, що дозволяє ефективно відтворити мікропрофіль зразка [87–88]. Здійснення аналізу проводиться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (зокрема MathCAD [91]).

Ряд Фур'є розкладає функцію (у цьому випадку профіль поверхні) на суму синусоїдальних складових. Загальний вигляд ряду Фур'є має вигляд формули 1.1 [87]:

$$f(x) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(kx) + B_k \sin(kx), \quad (1.1)$$

де A_0 є середнім значенням функції, а A_k і B_k амплітудні коефіцієнти для косинусоїдальної та синусоїдальної складових відповідно.

Періодичну функцію подано у вигляді розкладу в ряд Фур'є виду з формули 1.2 [87]:

$$f(x) \cong \sum_{k=1}^k a_k * \cos\left(\frac{2\pi k}{T} x\right) + b_k * \sin\left(\frac{2\pi k}{T} x\right), \quad (1.2)$$

де коефіцієнти ряду a_k , b_k та амплітуди A_k знаходиться шляхом інтегрування символічної залежності $f(x)$.

Амплітуди A_k пов'язані з відповідними коефіцієнтами ряду Фур'є a_k , b_k наступними співвідношеннями (формули 1.3–1.5) [87]:

$$a_k = \frac{2 \int_0^T f(x) \cos(k \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot x}{T}) dx}{T} \quad (1.3)$$

$$b_k = \frac{2 \int_0^T f(x) \sin(k \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot x}{T}) dx}{T} \quad (1.4)$$

$$A_k = \sqrt{(a_k)^2 + (b_k)^2} \quad (1.5)$$

Так, порівнюючи показник амплітуди, можна визначити поверхню з меншим перепадом амплітуд, що може свідчити про меншу шорсткість поверхні.

Фрактальна розмірність поверхні паперу визначається на основі алгоритму фрактального аналізу, зокрема методу підрахунку розмірів (методу сітки). У межах цього підходу напівтонові чорно-білі зображення, отримані за допомогою профілометричного дослідження, автоматично сегментуються на вимірювану структуру та фон. Подальше оброблення передбачає накладання сітки квадратів фіксованого розміру ε , кожному з яких присвоювалося значення 1 у разі наявності хоча б одного чорного пікселя або 0 – за їхньої відсутності. Розмір квадратів поступово змінювався, і на кожному етапі обчислювалася кількість необхідних квадратів $N(\varepsilon)$ для покриття всієї структурної ділянки зображення. Визначені пари $(\varepsilon, N(\varepsilon))$ встановлюються.

Розрахунки фрактальної розмірності проводяться за формулою 1.6 [20]:

$$D = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1.6)$$

Фрактальний аналіз ґрунтується на оцінюванні складності та самоподібності поверхні на різних масштабних рівнях, що є інформативним для кількісного опису її шорсткості та текстури [20, 90].

Порівняльний аналіз підходів до опису поверхні паперу демонструє, що фрактальний аналіз дозволяє узагальнено характеризувати складну, ієрархічну та статистично неоднорідну структуру поверхні паперових основ одним параметром – фрактальною розмірністю [20, 90]. На відміну від спектрального аналізу, чутливого до окремих частотних складових профілю [21], фрактальний підхід безпосередньо враховує

багатомасштабний характер мікрорельєфу паперу та демонструє стабільність результатів при аналізі даних [20, 90].

1.3 Експериментальні методи дослідження

1.3.1 Методи дослідження поверхні

У межах поліграфічних досліджень поверхні паперу застосовують такі методи:

1. Контактна або безконтактна профілометрія для оцінювання мікрорельєфу поверхні. Стандарти: ISO 4287 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture [92]; ISO 4288 – Rules and procedures for the assessment of surface texture [93]; TAPPI T555 – Roughness of paper and paperboard (Sheffield method) [94].

2. Визначення пористості та повітропроникності поверхні. Оцінювання здатності основи поглинати фарбу та зв'язувальні компоненти. Стандарти: ISO 5636-3 – Air permeance (Bendtsen method) [95]; ISO 5636-5 – Air permeance (Gurley method) [96]; TAPPI T460 – Air resistance of paper (Gurley method) [97].

3. Визначення змочуваності та поверхневої енергії. Вимірювання контактного кута змочування тестовими рідинами. Стандарти: ISO 15989 – Paper and board – Determination of wettability (contact angle method) [98]; ASTM D7334 – Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments [99]; TAPPI T458 – Surface wettability of paper (Cobb test, для паперу) [100].

4. Дослідження морфології та однорідності поверхні. Візуалізація дефектів, волоконної структури, покриттів. Стандарт: ISO 12625-1 – Paper and board – Test methods for physical properties [101].

Так, поліграфічні методи дослідження поверхні основ дозволяють комплексно оцінити мікрорельєф, пористість, змочуваність та однорідність поверхневого шару.

Для дослідження поверхні паперових основ у поліграфічних процесах доцільно застосовувати контактну та оптичну профілометрію, оскільки ці методи дозволяють кількісно оцінити параметри мікрорельєфу, що безпосередньо визначають умови взаємодії поверхні з друкарською фарбою. В ході досліджень структури поверхні паперу

[90] продемонстровано, що аналіз профілограм, отриманих за допомогою контактної профілометрії, дає змогу встановити закономірності зміни шорсткості, висотних параметрів профілю та їх кореляцію з неоднорідностями паперового полотна, зокрема в зонах із водяними знаками.

Вимірювання кута змочування є обґрунтованим доповненням до профілометричних методів, оскільки саме змочуваність поверхні визначає характер розтікання фарби, глибину її проникнення та адгезію до паперової основи. У поліграфічних дослідженнях показано, що структурні параметри поверхні паперу, встановлені методами профілометрії, тісно пов'язані з поверхневою енергією та змочувальними властивостями, які, зі свого боку, впливають на якість відтворення штрихових і тонких графічних елементів [102].

1.3.2 Методи дослідження адгезії

1. Стрічковий метод (tape test). Якісне або напівкількісне оцінювання адгезії друкованого шару до основи. Стандарти: ISO 2409 – Paints and varnishes – Cross-cut test [103]; ASTM D3359 – Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test [104].

2. Випробування на стирання. Оцінювання стійкості друкованого шару до механічного зношування. Стандарти: ISO 7784-2 – Abrasion resistance (rotating abrasive rubber wheels) [105]; TAPPI T830 – Ink rub resistance of printed paper [106]; ASTM D5264 – Abrasion resistance of printed materials [107].

3. Метод подряпин (scratch test). Визначення межі руйнування або відшарування шару. Стандарти: ISO 1518 – Paints and varnishes – Scratch test [108]; ASTM D7027 – Evaluation of scratch resistance [109].

4. Стійкість до впливу вологи та хімічних середовищ. Непряме оцінювання адгезії та довговічності шару. Стандарти: ISO 2812 – Resistance to liquids [110]; ASTM D1308 – Effect of household chemicals on clear and pigmented coatings [111].

Зазначені методи та стандарти утворюють комплексну систему оцінювання властивостей основ і друкованих шарів, що дозволяє прогнозувати змочування, адгезію

та експлуатаційну стабільність друкованих елементів у поліграфічних застосуваннях і друкованій електроніці.

1.4 Технологічний процес створення елементів електроніки на папері, які виготовляються способами друку

Розроблення технологічного процесу та методики підготовки паперу як основи під функціональну електроніку наразі активно проводиться, але здебільшого зосереджено на можливому використанні спеціальних типів паперу, що мають відповідні показники пористості та шорсткості [22]. До таких типів паперу також у подальшому може застосовуватися спеціальна підготовка, як, наприклад, нанесення додаткового покриття [112–119], обробка плазмою [7] тощо. Недостатня увага приділяється можливому вирішенню проблеми використання найбільш екологічного та дешевого варіанту основи – паперу, зокрема за допомогою підготовки класичних типів паперу під відповідний процес нанесення напівпровідникових і провідних шарів та вимог до таких основ.

Здебільшого дослідження гнучкої електроніки концентрується на використанні полімерів синтезованого походження (поліетилентерефталат [36], поліімід [36], полідиметилсилоксан [2]). Цей вибір зумовлений відповідністю характеристик даних полімерів базовим вимогам до готових виробів – шорсткості, всотуваності поверхні, реологічним властивостям [38], міцності при згинанні [69]. Основна характеристика технологічного процесу наведена в таблиці 1.2. Розглядаються такі елементи друкованої електроніки – RFID, сенсори, транзистори, пристрої збору і збереження енергії, дисплеї, прозорі провідникові електроди, струмопровідні доріжки.

Стан поверхні основи є одним із визначальних чинників у процесі формування провідних шарів друкованої електроніки, оскільки параметри мікрорельєфу, шорсткості та змочуваності безпосередньо впливають на рівномірність нанесення фарби та адгезію струмопровідного шару [7]. Надмірна шорсткість або пористість поверхні зумовлює нерівномірний розподіл пастоподібних матеріалів і зростання питомого електричного опору сформованих доріжок, що було відзначено для паперових і пористих основ [7, 28].

Таблиця 1.2. Характеристика складників технологічного процесу друкованої електроніки

Варіанти матеріалів основи	Варіанти попередньої обробки основи	Технологія нанесення	Постобробка
1. Папір [22, 23, 75] 2. Поліетилен терефталат [36] 3. Поліімід [36]	1. Покриття і ламінування [2] 2. Обертальне покриття поверхні [73] 3. Опромінення вакуумним ультрафіолетом [73] 4. Покриття смолами [34] 5. Термічна обробка [2, 36] 6. Обробка плазмою [2, 34, 41] 7. Целюлозне покриття[28] 8. Обробка коронним розрядом[6]	1. Глибокий друк [30, 38] 2. Трафаретний друк [30, 31] 3. Струминний друк[2, 32, 34, 36, 37]	1. Занурення в розчин [2] 2. Термо- [2, 67, 80], фото- [2, 7], плазмова [2, 7], хімічна обробка [2, 7]

Оскільки папір – це пористий капілярно-гетерогенний матеріал на основі целюлози, його реакція на розряд відрізняється від реакції гладких полімерних плівок [113]. Під дією високовольтного розряду в повітряному зазорі утворюється плазма, що містить озон (O_3), атомарний кисень та вільні радикали. Відбувається розрив зв'язків С-С та С-Н на поверхні целюлозних волокон. У результаті відбувається формування полярних функціональних груп (карбонільних $-C=O$, карбоксильних $-COOH$ та гідроксильних $-OH$). Це радикально підвищує поверхневу енергію паперу, роблячи її гідрофільною, що важливо для адгезії фарб [114]. У результаті збільшується мікрошорсткість та фрактальна розмірність поверхні [115].

Важливим параметром паперових основ є їх мікротопографія поверхні [38], оскільки вона впливає на якість друку та функціональні характеристики готових електронних компонентів.

Товщина шару чорнила та ширина електропровідної доріжки друкованого шаблону [114] є параметрами, які визначають електричну провідність та функціональність готових компонентів. Електрична провідність [3], зі свого боку, є важливим показником якості продукції друкованої електроніки, оскільки вона безпосередньо впливає на життєвий цикл електронних компонентів.

У науковій літературі описано різні підходи до підготовки паперових основ для друку елементів електроніки, зокрема нанесення функціональних покриттів, плазмову обробку та термічну стабілізацію, які спрямовані на підвищення адгезії друкованих шарів і покращення електричних характеристик сформованих провідних елементів [7, 28]. Водночас аналіз наявних досліджень свідчить, що питання цілеспрямованої модифікації поверхні паперу як окремого технологічного етапу розглядається фрагментарно, а вплив конкретних методів обробки на відтворюваність і стабільність друкованих провідних доріжок висвітлено недостатньо повно [7, 28]. Незважаючи на зафіксований позитивний ефект, кількісне оцінювання впливу обробки коронним розрядом на ефективність формування провідних шаблонів на паперових основах залишається обмеженою [6].

Загалом на базі аналізу можна сформувати такий узагальнений алгоритм процесу друкування компонентів електроніки, який, здебільшого, співпадає з класичним процесом друкування (рис. 1.5).

Застосування цих технологій та методів у галузі друкування електроніки дозволяє створювати гнучкі, легкі та потенційно економічно ефективні електронні компоненти [7].

1.5 Основні класи пристроїв друкованої електроніки та напрями застосування

До основних типів пристроїв друкованої електроніки належать функціональні елементи та системи, у яких електричні, сенсорні або енергетичні функції реалізуються через нанесення провідних, напівпровідникових та ізоляційних матеріалів адитивними методами на гнучкі або жорсткі основи. Аналіз літературних джерел дозволяє виокремити кілька ключових класів таких пристроїв, що вже продемонстрували практичне застосування [8, 9, 115–117]:

– сенсорні пристрої – сенсори є одним із найбільш розвинених класів друкованої електроніки та охоплюють системи для вимірювання фізіологічних, механічних і хімічних параметрів [8, 9];

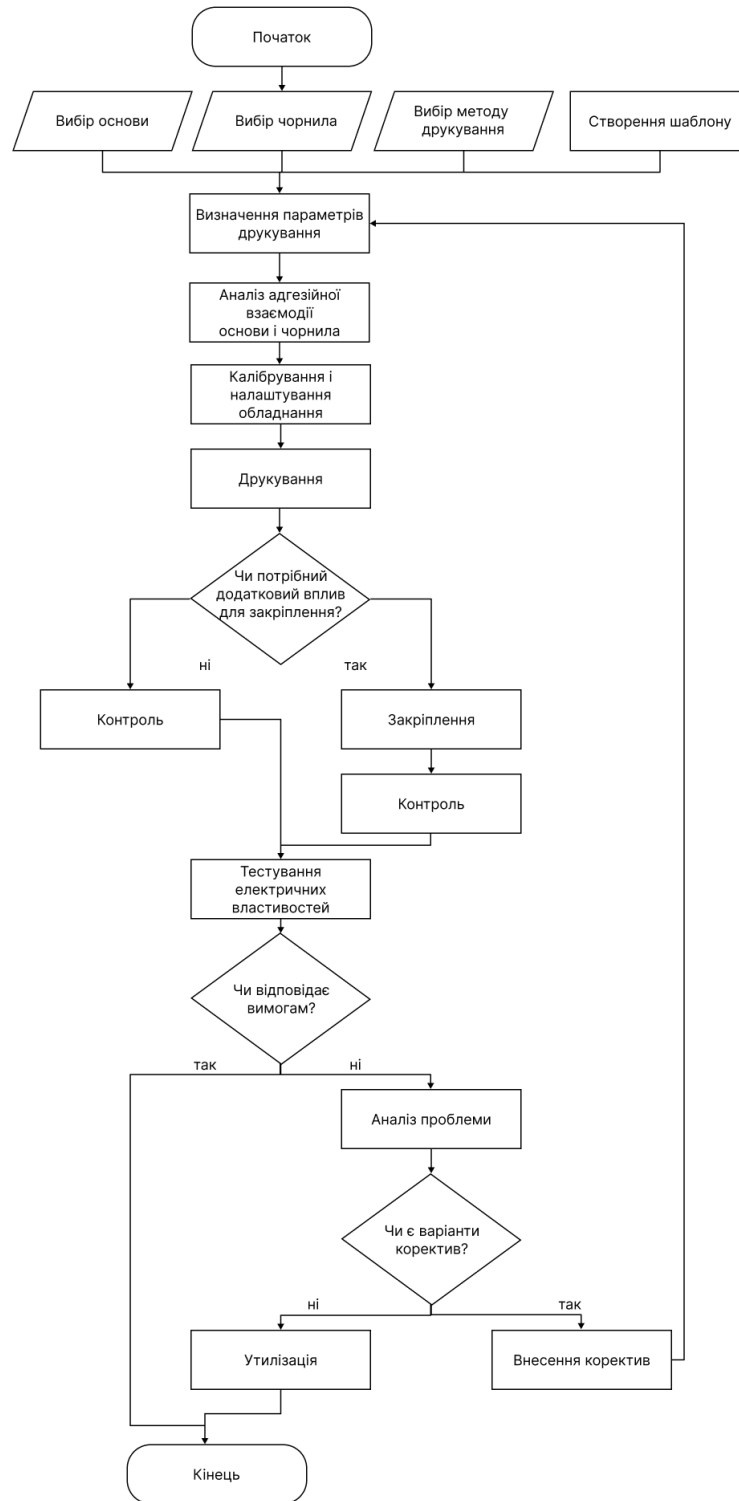


Рис. 1.5. Узагальнений алгоритм процесу друкування електроніки

- енергетичні пристрої та накопичувачі енергії – до цього класу належать друковані суперконденсатори, мікроакумулятори та інші елементи зберігання енергії [9, 116, 117];
- оптоелектронні та фоточутливі пристрої – друковані фотодетектори та світлочутливі елементи формують ще один клас пристроїв друкованої електроніки. [116, 117];
- інтегровані гнучкі та “розумні” системи – окрему групу становлять комплексні пристрої, в яких поєднуються сенсорні, провідні та енергетичні елементи, виготовлені друкарськими методами [8, 9], а також такі, що застосовуються в носимій електроніці, біоелектроніці, а також у рішеннях для упаковки з функціями ідентифікації та зв’язку, зокрема надрукованих RFID-мітках на упаковці та елементах інтернету речей [36].

1.6 Патентний пошук за тематикою

На основі ДСТУ 3575-97 «Патентні дослідження. Основні положення і порядок проведення» [118] проведено патентний пошук за класами МКВ, регламенти патентного пошуку наведено в таблиці 1.3 [119–121].

Таблиця 1.3. Регламент патентного пошуку

Предмет пошуку	Напрямки пошуку	Мета	Країни	Класифікаційні індекси	Ретроспектива	Ресурси пошуку
Технології створення паперу для друкованої електроніки, технології підготовки паперової основи, пристрої з паперовою основою	Підготовка чи створення паперової основи, створення пристрою на базі паперової основи, створення пристрою на базі гнучкої непаперової основи	Узагальнення, систематизація і визначення тенденцій розвитку методів і засобів створення друкованої електроніки на паперовій основі	США, Японія, КНР, Іспанія, Україна	C08K 3/04, B05D3/06, G06K19/077, C01G41/00, B42D15/10, B42D25/29, G06K19/02, B82Y10/00, D02G3/16	2003 - 2022	Espacenet, Google Patents, Patent Public Search Basic (PPUBS Basic)

Приклади патентів, що визначені в результаті пошуку, зазначені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Приклади патентів за регламентом пошуку

№	Країна, що видала патент, вид і номер охоронного документу, класифікаційний номер, МКВ	Заявник з вказівкою країни, номеру заявки, дата публікації	Суть поданого технічного рішення й мета його здійснення за змістом опису винаходу
1	Україна UA57835 B42D15/10 [122]	Круль Йоханнес, де Хессе Вільгельм Бернардус, ; Маттерс Марко; Україна; 2003-07-15	Винахід є основою, яка виготовлена з паперу і обладнана щонайменше однією інтегральною схемою, що виготовлена з напівпровідникового органічного полімеру
2	Китай CN207217549 B82Y10/00 [123]	ING HONGLONG; ZENG YONG; YAO RIHUI; Китай, 2018-04-10	Корисна модель належить до галузі пристроїв відображення, є мембранним транзистором на нанометровій паперовій основі.
3	EP3187322A1, European Patent Office, B29C45/14811 [124]	Christophe ChartierGaël DEPRESJean-Marie Vau, 2015-12-31, ЄС	Винахід належить до способу вбудовування етикетки, яка, по суті, складається з паперової основи, що містить електронні чорнила та/або друковану електронну схему та/або пристрій (так створюється схема на паперовій основі) безпосередньо у сформовану пластикову деталь. Вбудовування паперової схеми та виготовлення пластикової деталі виконується за одну операцію.
4	EP3405011A1, European Patent Office, H05K1/0386 [125]	Gaël DEPRES Jean-Marie Vau, 2017-05-16, ЄС	Винахід належить до паперового друкованого електронного пристрою, що містить один або кілька аркушів паперу, просочених смолою для заповнення пустот (або пор) пористих мереж целюлозних волокон і, зокрема, для насичення зазначених пористих мереж целюлози волокон, а також для покриття зовнішніх поверхонь друкованої електроніки зазначеною смолою.
5	US2012234585, США, B41J2/01 [78]	SCHMIDT WOLFGANG, 2012-09-20, B32B5/18	Матеріали основи для друку електропровідних структур струминним друком фарбами, що містять струмопровідні частинки, призводять до низького опору надрукованих структур без термічної постобробки, якщо вони містять мікропористий шар із середнім розміром пор менше 100 нм як зовнішнього шару.

За сформованими напрямами було проведено патентний пошук. Усього розглянуто 62 патенти. Ретроспектива із кількістю зареєстрованих патентів зображена на рис. 1.6. Визначено, що в 2022 році було зареєстровано найбільшу кількість патентів – 11. На початковому проміжку ретроспективи – 2003–2005 рр. – знайдено лише один зареєстрований патент за обраним напрямом (рис. 1.6).

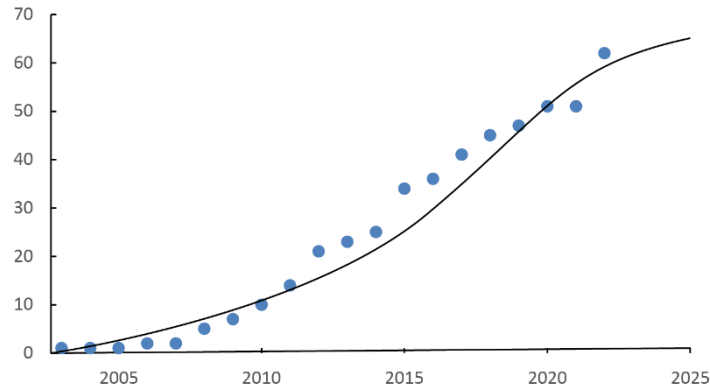


Рис. 1.6. Кумулятивна крива розвитку технологій відповідно до обраних напрямів

Було розподілено обрані патенти за напрямками:

- підготовка чи створення паперової основи;
- створення пристрою на базі паперової основи;
- створення пристрою на базі гнучкої непаперової основи.

Результати представлено у вигляді кругової діаграми на рис. 1.7. Найбільше зареєстровано патентів за напрямом створення пристрою на базі гнучкої непаперової основи.

Отже, патентні дослідження в галузі друкованої електроніки на паперових основах тенденцію до збільшення створення пристроїв на базі гнучких непаперових основ. Найвища патентна активність спостерігалася у 2022 р., що доводить актуальність та перспективність цього напрямку. Значна увага приділяється вдосконаленню паперових основ за допомогою різних способів обробки, щоб зробити їх придатними для друкованої електроніки, що свідчить про перехід до більш економічно ефективних і широкодоступних матеріалів. Ця тенденція підкреслює важливість дослідження та вдосконалення процесів підготовки паперових основ як ключового напрямку розвитку в галузі друкованої електроніки.



Рис. 1.7. Діаграма патентування технологій відповідно до обраних напрямів за тематикою: Створення пристрою на базі паперової основи – 21; Підготовка чи створення паперової основи – 14; Створення пристрою на базі гнучкої непаперової основи – 25

1.7 Висновки до першого розділу і постановка завдань дослідження

1. Проведений аналітичний огляд показав, що друкована електроніка є одним із перспективних напрямів розвитку промисловості електроніки, який поєднує технології друку та матеріалознавства. Особливу увагу привертають гнучкі екологічні основи – зокрема папір, який завдяки своїй біорозкладності та низькій вартості може стати конкурентною альтернативою полімерним основам. Однак його висока шорсткість, пористість і гідрофільність знижують адгезію та стабільність струмопровідних шарів, що створює потребу в попередній поверхневій обробці.

2. Аналіз наукових джерел засвідчив, що серед відомих методів підготовки целюлозних основ (плазмова, хімічна, термічна, УФ-обробка) можна виокремити обробку коронним розрядом, яка забезпечує підвищення поверхневої енергії та змочуваності без використання складного обладнання.

3. Проведений аналіз методів друку показав, що трафаретний друк є ефективним методом для нанесення струмопровідних матеріалів, зокрема графенових фарб, завдяки можливості формувати товсті та рівномірні шари із задовільною електропровідністю.

4. Визначено, що подальші дослідження необхідно спрямувати на комплексне оцінювання морфологічних та електрофізичних змін поверхні паперу після обробки коронним розрядом і встановлення зв'язку цих змін із якістю друкованих провідних шарів.

5. Відповідно до проведеного аналізу сформульовано такі завдання дослідження:

- провести аналіз сучасних технологічних процесів створення друкованої електроніки із використанням технологій поліграфічного виробництва у порівнянні з іншими методами, визначити можливі напрямки застосування друкарських технологій, проблеми забезпечення якості елементів друкованої електроніки та можливі шляхи їх розв'язання, зокрема визначити основні проблеми, що впливають на стабільність друкованих струмопровідних шарів;

- сформулювати методику експериментальних досліджень, обрати матеріали, методи та устаткування для досліджень, обґрунтувати засоби та визначити режими підготовки целюлозних основ, технологічного процесу трафаретного друку та можливої післядрукарської обробки. Провести порівняльний аналіз показників якості струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими засобами, з аналогами, виготовленими іншими методами;

- дослідити теоретично та експериментально вплив параметрів обробки поверхні традиційними засобами поліграфічного виробництва (зокрема коронним розрядом) на параметри паперових основ (морфологію, шорсткість і поверхневу енергію тощо) та встановити технологічні режими обробки, які забезпечують найвищі друкарсько-технічні властивості під час нанесення фарбових струмопровідних шарів;

- становити взаємозв'язок показників якості струмопровідних доріжок, нанесених друкарськими методами, та режимів попередньої обробки основи, геометричних параметрів друкованих ліній, режимів післядрукарської обробки. Провести порівняльний аналіз параметрів якості досліджуваних зразків, отриманих друкарськими і недрукарськими методами;

- провести теоретичний аналіз можливих впливів на зразки під час їх експлуатації, розробити методику імітації експлуатаційних факторів (механічних, хімічних та термічних навантажень) та дослідити експериментально вплив штучного зношування на стабільність показників якості друкованих провідних шарів (питомого опору та цілісності), надрукованих на різних типах паперових основ;
- розв'язати багатокритеріальну задачу вибору параметрів оброблення паперової основи задля отримання якісних струмопровідних фарбових шарів, встановивши раціональні параметри обробки коронним розрядом, які забезпечують мінімальний питомий опір, високу рівномірність нанесення та відтворюваність результатів трафаретного друку;
- на основі теоретичних та експериментальних досліджень розробити удосконалений технологічний процес нанесення струмопровідних шарів із застосуванням трафаретного друку та технологічні рекомендації щодо підготовки паперових основ для друкованої електроніки, орієнтовані на масштабоване використання у поліграфічному виробництві.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виконання завдань дослідження було обрано відповідні матеріали, технології та методи. Основну увагу приділено експериментальному аналізу обробки паперової основи, адгезії основи і елетропровідних шарів та дослідженню поверхні.

2.1. Вибір зразків для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментів, спрямованих на підвищення адгезійних властивостей різних типів паперових поверхонь, було обрано зразки, що характеризуються основним призначенням та типом: глянцевої та матової. Відповідні зразки та їхні параметри наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Зразки паперу

Характеристика	Значення	
	Основа 1	Основа 2
Тип	Глянцевий	Матовий
Маса 1 м ² , г	115	
Формат, см	64×90	
Марка	Hi Dragon offset paper or OEM	
Виробник	Китай	
Яскравість, %	89 % (метод випробування ISO2470)	
Шорсткість, нм	1,4	2,7
Непрозорість, %	95 % (метод випробування ISO2471)	
Глянець, % (метод випробування T480)	65	32

Основи було об'єднано в групи залежно від типу паперу: до групи 1 належить глянцева папір, до групи 2 – матова папір. Кожну групу було поділено на підгрупи, одна з яких пройшла обробку, а інша залишилася необробленою. Оброблена підгрупа була додатково класифікована в діапазоні застосованого режиму обробки.

2.2 Удосконалена методика проведення обробки поверхні паперу

Для кожного варіанту основи методика передбачає обробку коронним розрядом. Кожен зразок був розміром 60×90 см. Для визначення більш ефективних параметрів

обробки враховували потужність коронного розряду. У результаті було сформовано дві групи комбінацій значень параметрів потужністю для визначення найбільш ефективного режиму обробки.

Для визначення раціональних параметрів проведення обробки до уваги брались два параметри коронування поверхні – швидкість проходження матеріалу через коронатор та потужність коронування. Так, було прийнято рішення сформуванати 2 групи комбінацій значень параметрів для аналізу найбільш ефективного режиму обробки.

Перед початком коронної обробки зразки паперу прикріплювали до плівкового полотна клейкою стрічкою і пропускали через модуль коронатора разом з полотном.

Коронну обробку проводили за допомогою коронуючого генератора Ahlbrandt, основні характеристики наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики коронуючого генератора Ahlbrandt [4]

Параметр	Значення
Діапазон напруги, кВт	0,2–8
Вхідний вольтаж, В	3*400
Вхідна потужність, кВА	13
Частота, Гц	50
Головний запобіжник, А	3*32

Сформовані комбінації параметрів зазначено в табл. 2.3 відповідно до кількості груп. Значення потужності було обрано згідно зі значеннями, які застосовуються до матеріалів у виробництві.

Таблиця 2.3. Параметри коронування поверхні зразків

№ варіанту	Швидкість проходження, м/хв	Потужність, Вт
Варіант №1	50	1000
Варіант №2	50	3000

Для порівняння було проведено вимірювання параметрів поверхні і структури паперу. Використано методіку мікроскопії для визначення структури поверхні. Використано контактну профілометрію для зняття показників профілю поверхні паперу.

Використано оптичну профілометрію для аналізу поверхневого профілю в збільшеному масштабі.

Основи були розбиті на групи відповідно до паперу та режиму. Позначення групи зразків:

- M0 – матовий папір без обробки;
- M1000 – матовий папір із режимом обробки 1000Вт;
- M3000 – матовий папір із режимом обробки 3000Вт;
- Г0 – глянцева папір без обробки;
- Г1000 – глянцева папір із режимом обробки 1000Вт;
- Г3000 – глянцева папір із режимом обробки 3000Вт.

У цьому дослідженні оцінюється вплив поверхневої обробки на провідні доріжки, створені за допомогою різних технологій нанесення.

2.3 Метод нанесення струмопровідних доріжок

У межах проведеного дослідження методи нанесення розглядалися як складова оцінювання впливу попередньої обробки поверхні паперових основ. Для формування струмопровідних доріжок було застосовано два технологічні підходи: трафаретний друк та порівняльне магнетронне напилення.

2.3.1 Трафаретний друк

У дослідженні було застосовано стандартний процес трафаретного друку з попереднім виготовленням форми за технологією StF [126] із використанням струмопровідних паст, зокрема графеновмісних фарб, що забезпечують необхідну товщину покриття для забезпечення провідності. Вибір цього методу зумовлений його здатністю формувати шари значної товщини, що є важливим для ефективного функціонування друкованих електронних елементів. Підготовчий етап включав виготовлення трафарету для формування струмопровідних шаблонів. Створення форми для трафаретного друку відбувається за допомогою фотополімерного закріплення [126].

Обрано трафаретну непофарбовану раму з лініатурою 60 ниток/дюйм. Профіль рами – пустотіла алюмінієва. Розмір рами – 30 см на 38 см. На формі розташовувалось 2 шаблони доріжок для друкування.

Друкування проводилось на ручній установці (рис. 2.1). Окрім того, трафаретний друк відзначається високою адаптивністю до різної в'язкості паст і особливостей поверхневої текстури паперової основи [30, 31]. Робоча суміш готувалася з додаванням 5 % розчинника, а процес сушіння здійснювався при температурі 50–60 °С [127].

Друкарський процес:

- закріплення друкарської форми у рамотримачі (форму закріплено в рамотримачі гвинтами-затискачами);
- встановлення технологічного проміжку (між друкарською формою та задруковуваним матеріалом) – 2 мм, для забезпечення найменшого спотворення зображення;
- встановлення переднього та бокового упорів для позиціювання задрукованого матеріалу;
- нанесення невеликої кількості фарби для отримання відбитка та перевірки його якості;
- сушіння фарби на матеріалі при 50–60°C у сушильній шафі протягом 10 хв.

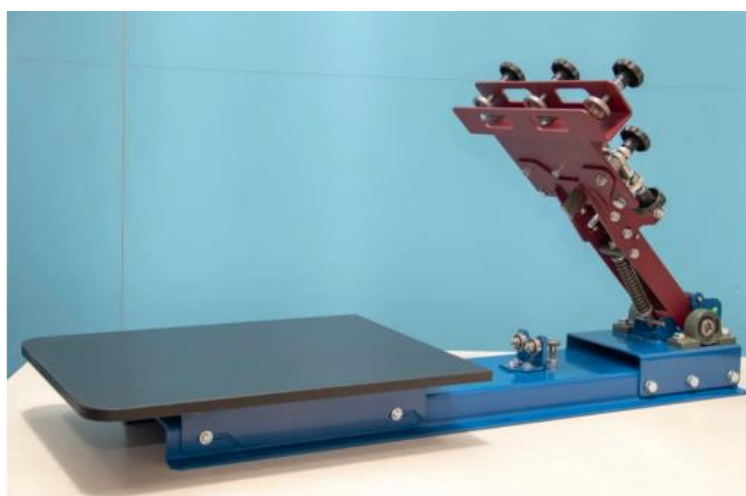


Рис. 2.1. Ручний верстат трафаретного друку на один колір HSP 1x1 P [128]

Відповідно до обраного методу друку обрано і відповідну фарбу. Характеристики наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Характеристики струмопровідної фарби для трафаретного друку [127]

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення	Метод випробування
Тип фарби	–	Струмопровідна, пластизольна фарба для трафаретного друку	–
Електропровідний компонент	–	Графен	–
Розчинник	–	UG-002H	–
Фарба/розчинник	%/%	100/5–15	–
Умови сушіння	°C/хв	50–60/10	–
Візуальний вигляд	–	Без таких дефектів, як сторонні домішки, кратери, апельсинова кірка і т.д.	–
Питомий опір	Ω	100 – 3000	IEC 60093:1980 [129]
Питомий поверхневий опір	Ω/sq	<1000	IEC 60093:1980 [129]
Рекомендована товщина плівки	мкм	>5	ISO 2808:2019 [130]
Розмір сітки	tpi	60–90	–
Адгезія (100 x 2 мм ²)	–	Стягування стрічкою Nichiban при 45 °C. Без відшаровування	ASTM D3359 [104]
Твердість (не повинна відшаровуватися від олівця класу F)	–	Пройдено	ISO 15184:2012 [131]
Стійкість до спирту (80 % етанолу) 1 кгс / м ² х10 циклів	–	Пройдено	ISO 2812-1:2007 [110]
Стійкість до стирання (метод гумки) 1,64 кгс x 35 циклів при товщині плівки >5 мкм	–	Пройдено	ISO 7784-2:2006 [105]
Стійкість до мастила (вазелін – 40 °C; 95 % відносної вологості; 24 години)	–	Пройдено	ISO 2812-2:2007 [110]
Основа	–	Пластик, папір, кераміка, метал і тканина	–

Розроблено топологію для проведення випробувань.

Зображення шаблону на трафаретній рамі продемонстровано на рис. 2.2.

Технічні характеристики топології:

- площа нанесення: 70×70 мм, що містить п'ять доріжок шириною 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм і 5 мм, кожна довжиною 70 мм;
- розмір тестового зразка: 80×70 мм, включаючи з мітками вирівнювання;
- дизайн було створено за допомогою програмного забезпечення Adobe Illustrator [132].



Рис. 2.2. Схема маски для шаблона струмопровідних доріжок

2.3.2 Порівняльне магнетронне напилення

Технологія магнетронного напилення з використанням алюмінію передбачає осадження для створення провідної плівки на основі. Процес можна детально описати так [45-46]:

1. Підготовка основи: паперова основа спочатку очищається і обробляється для покращення адгезії та проводиться згладжування будь-яких нерівностей поверхні, які можуть вплинути на процес осадження.
2. Осадження: алюміній випаровується у вакуумній камері, де він переходить із твердого стану в пароподібний, а потім рівномірно наноситься на основу.
3. Створення шаблону: для визначення специфічних зон провідності під час осадження алюмінію використовується маска.
4. Пост-обробка: після осадження основа проходить низку фінішних процесів, які включають термічне затвердіння для покращення властивостей і довговічності плівки.

Підготовка маски [133]:

- пластина була очищена ізопропіловим спиртом, а потім сумішшю сірчаної кислоти і перекису водню, нагрітої до 60 °С;
- нанесено сухий фоторезист, експонування відбувалося у вакуумній камері.

Пластина була проявлена і протравлена для створення маски.

Для підготовки маски використано пермалой (81 НМ, 100 мкм) [134].

Вакуумна система КАТОД-1М спеціально розроблена для нанесення тонких плівок на основи у вакуумній камері методом напилення. Вона використовує прискорені іони робочих газів, що генеруються тліючим розрядом у схрещених електричному і магнітному полях, і підходить для лабораторних і науково-дослідних цілей [46].

Для очищення основи перед установкою в камері використовувався повітряний роздув.

Напилення відбувалося з використанням таких матеріалів:

- алюміній (А999) [135];
- хром (електролітичний ЕРС) [136];
- титан (VT 10) [137].

Комбінації матеріалів:

1. основний шар – алюміній;
2. основний шар – алюміній, підшар – хром;
3. основний шар – алюміній, підшар – титан.

Умови проведення магнетронного напилення [138–140]:

- вакуумна камера готувалася шляхом відкачування повітря до тиску $3,5 \times 10^{-6}$ мм рт.ст.,
- встановлення робочого тиску аргонної плазми $5-7 \times 10^{-3}$ мм рт.ст;
- умови нанесення хрому: 500-520 В, 0,8 А, 3 хвилини (0,05 мкм);
- умови нанесення титану: 400 В, 2 А, 1 хвилина (0,05 мкм);
- умови нанесення алюмінію: 400 В, 2,5 А, 40 хвилин (1 мкм);

– температура робочого столика перед нанесенням покриття підтримувалася на рівні до 50 °С для десорбції абсорбованих папером газів.

Дизайн було створено за допомогою програмного забезпечення AutoCAD [141].

2.4 Гравіметричний метод дослідження

Для визначення середньої товщини нанесеного електропровідного шару графенової фарби UGDC033SSCDSV було використано гравіметричний (ваговий) метод. Цей метод базується на визначенні маси сухого залишку фарби на основі та подальшому розрахунку лінійного параметра товщини через відому густину матеріалу та площу задрукованої поверхні [142].

Вимірювання проводилися з використанням прецизійних лабораторних вагів AD-200 (Axis, Польща) з дискретністю 0,001 г (рис. 2.3) [143]. Вибір цього приладу зумовлений необхідністю високої точності при роботі з тонкими плівковими структурами.



Рис. 2.3. Визначення маси зразка на лабораторних вагах AD-200 під час проведення гравіметричного аналізу

Алгоритм проведення дослідження:

1. Підготовка зразків: зразки основи було очищено та витримано в лабораторних умовах для стабілізації вологості та температури.
2. Первинне зважування: визначалася маса кожної чистої основи на вагах AD-200.

3. Процес друкування, описаний в розділі 2.3.1.
4. Вторинне зважування: визначалася маса зразків з висушеним шаром фарби (m_2).
5. Розрахунок: середню товщину фарбового шару (H , мкм) розраховували за формулою 2.1:

$$H = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 10^4}{S \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

де: ($m_2 - m_1$) – маса сухого залишку фарби, г; S – площа нанесення, cm^2 ; ρ – густина сухого шару чорнила, g/cm^3 ; 10^4 – коефіцієнт перерахунку сантиметрів у мікрометри.

Для мінімізації випадкових похибок вимірювання проводилися для серії з 5 зразків, після чого обчислювалося середнє арифметичне значення та стандартне відхилення.

2.5 Оптичні методи досліджень

2.5.1 Метод проведення оптичної мікроскопії

Оптичні дослідження зразків здійснено за допомогою міроскопа Sigeta Biogenic Lite 40x [144]. Основними характеристиками, які були важливі для вимірювання в межах роботи:

- об’єктиви зі збільшеннями: 40x, 100x, 400x(s), 1000x(s, oil) – напів-планахроматичні;
- діапазон збільшення приладу – від 40 до 2000 разів;
- револьверна головка: на 4 об’єктиви, орієнтована всередину;
- механічний предметний столик розміром 145x155 мм, який переміщається по осях X–Y 76x50 мм з кроком 0,1мм;
- вбудована регульована система освітлення Келера.

Візуалізацію та калібрування здійснено в програмному забезпеченні TourView [145] (можливість створення направляючих ліній з відображенням розмірів), за допомогою еталонних розмірних шкал (рис. 2.4).

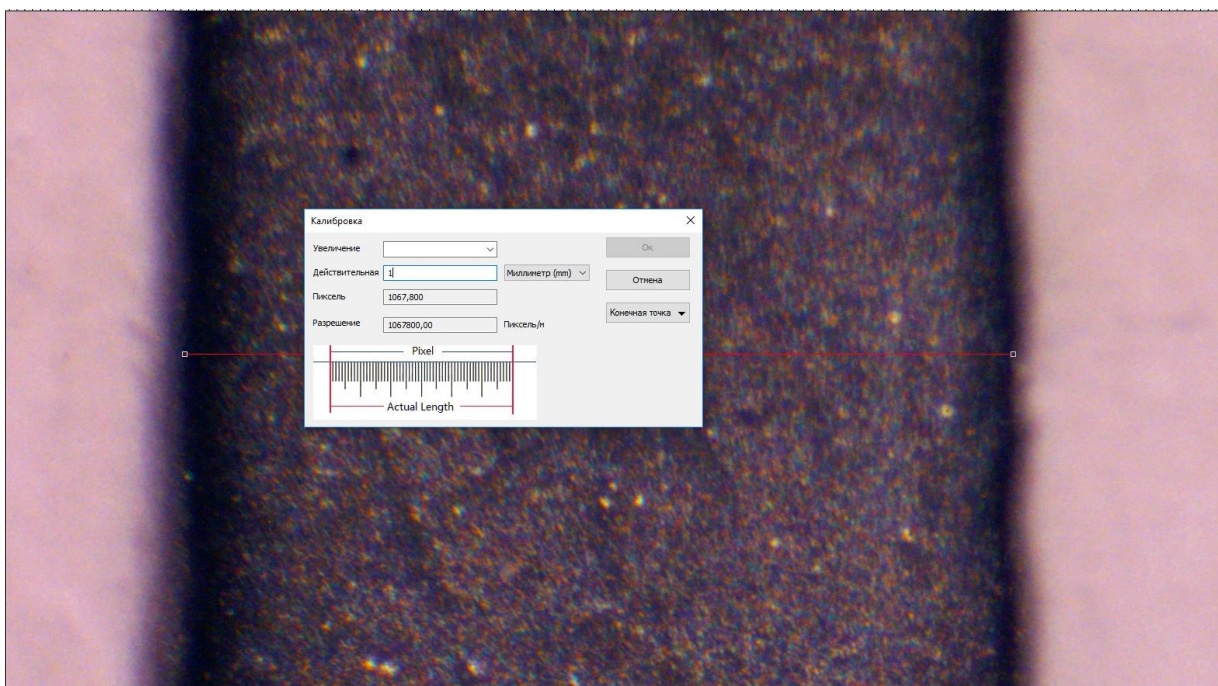


Рис. 2.4. Калібрування мікроскопу в програмному забезпеченні TopView

Досліджено поверхневу структуру паперу в групах оброблених і необроблених зразків. Було використано 4 оброблені зразки з групи 1 та групи 2. Також було досліджено структуру базових зразків. Усі зразки було підготовлено за розмірами, покладено на предметний столик, і зафіксовано затискачами.

Після нанесення струмопровідних доріжок на папір досліджено поверхню нанесеного шару за допомогою мікроскопу в трьох ділянках вздовж кожної нанесеної провідної доріжки, для отримання узагальненої інформації по всій доріжці.

Розмір зразків, для яких проводилося вимірювання 80×80 мм. Збільшення – 40х, 100х.

2.5.2 Метод проведення вимірювань кута змочування

Кути змочування матеріалів визначали за допомогою цифрової камери та оптичного мікроскопа (цифрова камера Delta Optical HCDE-50, Delta Optical, Шанхай, Китай) і програмного забезпечення ScoreTek View (версія 1.0.0.1, ScoreTek Optics Electronics, Ханчжоу, Китай) за методикою, описаною в [146]. Для точного дозування об'єму краплі досліджуваної рідини використовували мікропіпетку. Краплі об'ємом 5

мкл наносили в десять різних точок на поверхні зразка. Після вимірювання кутів контакту зразки сушили при 30–35 °С протягом 5 хв.

2.6 Метод проведення профілометрії

2.6.1 Контактна профілометрія

У межах дослідження контактна профілометрія застосовується як метод аналізу топографії поверхні паперових основ для кількісного визначення параметрів шорсткості.

Вимірювання параметрів шорсткості зразків виконувалося з використанням контактного профілометра MarSurf PS1 [147]. Для дослідження застосовувався щуп із радіусом голки 2 мкм, навантаженням 0,7 мН та довжиною трасування 4 мм.

Аналіз поверхні здійснювався за допомогою алмазного щупа, який формує збільшене зображення профілю зразка, що забезпечує детальну візуалізацію топографії поверхні.

Вимірювання здійснювалися за швидкості переміщення датчика 0,15 мм/с, що було обрано як оптимальне значення для забезпечення балансу між точністю та ефективністю збору даних [147].

Метод контактної профілометрії використовується для виявлення мікроструктурних змін поверхні паперових основ після обробки. Отримані дані профілю поверхні є важливими для встановлення кореляції між текстурними характеристиками основи та адгезією струмопровідної фарби.

Поверхневі параметри, які вимірюються:

– R_a – середнє значення шорсткості – середнє арифметичне абсолютних значень ординат профілю шорсткості (DIN EN ISO 4287) [92];

– R_z – висота нерівностей профілю – середнє значення висоти п'яти найбільших нерівностей профілю на відрізьку базової довжини (DIN EN ISO 4287) [92];

– R_{\max} – максимальна висота профілю – найбільша відстань по вертикалі між найвищою вершиною та найглибшою западиною профілю шорсткості на базовій довжині (DIN EN ISO 4287) [92].

Профілометричне дослідження було проведено для шести груп зразків паперу, кожна з яких включала по три зразки з індивідуальним маркуванням. Для кожного зразка здійснювалося по 10 вимірювань у машинному напрямі та 10 – у поперечному, відповідно до схеми вимірювання. За підсумками дослідження сформовано звіт, що містить повні дані вимірювань, значення параметра R_a (середня шорсткість), R_z , R_{\max} .

Умови проведення робіт: згідно з ДСТУ EN ISO 187:2023 Папір, картон та целюлоза. Стандартна атмосфера для кондиціювання та випробування, метод контролю за атмосферою та умовами кондиціювання зразків.

2.6.2 Оптична профілометрія

Дослідження тривимірного рельєфу поверхні зразків здійснювалося з використанням безконтактного інтерференційного профілометра Micron-alpha (рис. 2.5) [148]. Зазначений прилад забезпечує вимірювання топографії з нанометровою роздільною здатністю у вертикальній площині, а вбудоване програмне забезпечення дозволяє здійснювати візуалізацію 3D-рельєфу та розрахунок ключових параметрів шорсткості поверхні.

Зразки для оптичного профілювання не потребують складної попередньої обробки та характеризуються мінімальними вимогами до підготовки поверхні, як і зразки для контактної профілометрії.

На кожному зразку реєструвалося декілька досліджуваних ділянок розміром 140×100 мкм. Горизонтальна роздільна здатність (X, Y) становила 0,15 мкм, максимальна висота вимірювання рельєфу по осі Z – до 50 мкм, водночас вертикальна роздільна здатність досягала 5 нм.

Оптична інтерференційна методика забезпечує можливість вимірювання параметрів шорсткості, висоти та глибини рельєфу, а також просторового розподілу

поверхневих виступів. Тривалість одного вимірювання становила від 0,1 до 3 хв, що свідчить про високу ефективність та оперативність застосованого підходу.



Рис. 2.5. Загальний вигляд профілометра «Micron-alpha»

2.7 Метод проведення вимірювань електрофізичних показників готового виробу

Як показник якості нанесення контактних доріжок було обрано опір цих контактних доріжок, оскільки метою є досягнення максимально малого власного опору доріжок.

Методологія передбачає вимірювання електричних характеристик нанесених елементів.

Вимірювання показників нанесених доріжок проводилися за допомогою лабораторного мультиметру Dnipro-M SM600 [149]. За допомогою мультиметру проводилося вимірювання опору доріжок. Для нівелювання негативного ефекту протикання поверхні доріжок, через м'який профіль поверхні, використовуються мідні клеми, які забезпечують уникнення спотворень значень при вимірюваннях. Вимірювання проводиться на відстані 0,5 см від країв струмопровідної доріжки.

Необхідне обладнання:

- мультиметр;
- вимірювальні клемаи;
- мідні проміжні клемаи.

Процедура вимірювання:

- підготовка: фіксація паперової основи на столику, щоб запобігти її переміщенню;
- калібрування датчиків: налаштування відстані для щупів та калібрування контактної опору – контактний опір клем має бути мінімальний і незначний;
- позиціонування щупів: розташування двох щупів і клем по довжині провідної доріжки на паперовій основі;
- вимірювання електричних параметрів: для отримання стабільних результатів проводиться триразове вимірювання;
- обчислення опору провідної доріжки – як середнє арифметичне з трьох вимірювань;
- обчислення поверхневого опору провідного матеріалу з використанням вимірюваного опору і геометричних розмірів [150]:

$$R_s = R \times (W/L), \quad (2.2)$$

де, R_s – поверхневий опір, Ом; R – вимірюваний опір, Ом; W – ширина доріжки, мм; L – довжина доріжки, мм.

2.8 Методика імітації зношування виробів

Аналіз сучасних досліджень у галузі друкованої електроніки демонструє, що графенові струмопровідні доріжки, сформовані методами трафаретного та інших адитивних видів друку, активно застосовуються в широкому спектрі функціональних виробів [151–153]. Водночас основними перевагами таких рішень є технологічна простота, сумісність із низькотемпературними процесами та можливість формування товстих провідних шарів без використання вакуумного обладнання [153, 154].

Зазначається, що графенові провідні структури зберігають функціональність у виробках, орієнтованих на масове виготовлення та одноразове або короткочасне використання [152, 154]. Окрему увагу в наукових працях приділено питанням захисту друкованих провідних доріжок від впливу навколишнього середовища, зокрема вологи та кисню, [155]. Із урахуванням поєднання низької вартості, екологічності паперових основ, масштабованості трафаретного друку та достатнього рівня електропровідності графенових доріжок, саме інтелектуальна упаковка розглядається як один із найбільш доцільних напрямів практичного застосування досліджуваних струмопровідних структур, однак таке застосування не єдине. Додаткові компоненти можна друкувати і на основах, які в подальшому будуть механічно зкріплюватись на інших поверхнях, як, наприклад, наклейки, так і застосовуватись у книжковому виробництві, наприклад, для друку на форзаці необхідних струмопровідних елементів [1, 151, 152, 154, 156].

Під час дослідження було застосовано існуючу методику визначення механізму формування зношеності [157] і сформовано узагальнену схему впливу експлуатаційних чинників на процеси зношування (рис. 2.6). Схема відображає послідовність і взаємозв'язки між механічними, хімічними, електричними, кліматичними та вібраційними навантаженнями, які зумовлюють зміни у структурі струмопровідних шарів і основи. Ідентифікацію типів зношування здійснено відповідно до положень ДСТУ 2823-94 [158], що дало змогу класифікувати процеси втрати експлуатаційних властивостей за їхнім походженням і характером впливу (рис. 2.6). Схему було сформовано для типового виробу інтелектуальної упаковки.

У межах дослідження запропоновано проведення імітації перебування виробу в несприятливих умовах для вимірювання показників опору до та після імітації. Пропонуємо виконати такі види випробувань:

- імітація механічного зношування [159];
- імітація впливу забруднювальних речовин [159];
- імітація температурного впливу [160].

Імітація механічного зношування проводиться за допомогою ротаційного імітатора зношування. У барабан імітатора вкладаються кульки – зношувальний агент. Для надання паперовим зразкам жорсткості використовуються спеціальні смужки жорсткості. Вони під'єднуються до паперового зразка за допомогою фторпластових затискачів – гвинту і гайки.

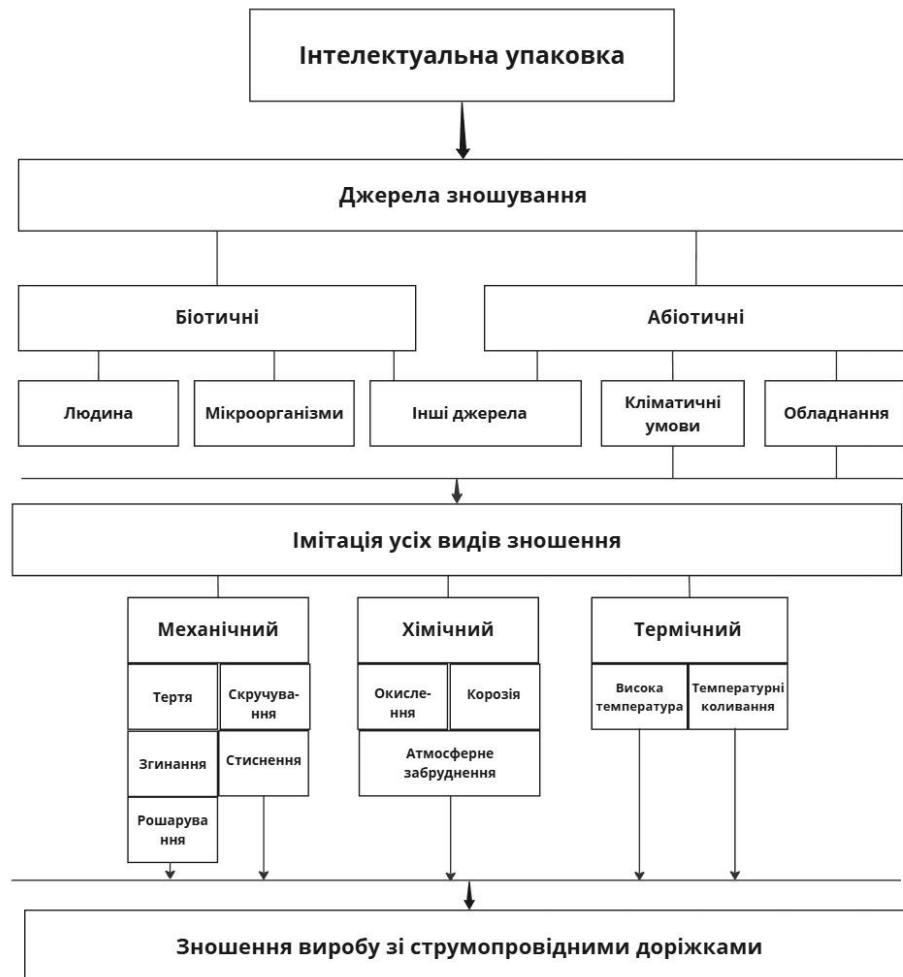


Рис. 2.6. Механізм формування зношеності інтелектуальної упаковки

Процес складається з таких етапів:

1. Підготовка зразків паперу:

– готуються паперові основи з алюмінієвими струмопровідними доріжками необхідних розмірів (зазвичай 70x70 мм);

- прикріплення смуг жорсткості: спеціальні смуги жорсткості готуються для забезпечення структурної підтримки зразків паперу. Ці смуги необхідні для запобігання надмірному згинанню та розриву під час моделювання зношування;

- фіксація смуг: смуги жорсткості кріпляться до зразків паперу за допомогою фторопластових затискачів. Кожен затискач має гвинт і гайку, щоб надійно закріпити смуги на папері, не пошкоджуючи провідні доріжки.

2. Налаштування ротаційного імітатора зносу:

- завантаження барабана: барабан ротаційного імітатора зносу завантажується абразивним матеріалом, невеликими кульками, виготовленими зі скла. Кількість кульок можна варіювати;

- розміщення зразків: підготовлені зразки паперу з прикріпленими смужками жорсткості поміщаються всередину барабана імітатора. Зразки мають бути рівномірно розподілені і надійно закріплені, щоб уникнути перекриття або заплутування під час обертання.

3. Налаштування параметрів імітатора:

- швидкість обертання: встановлюється швидкість обертання барабана. Ця швидкість визначає інтенсивність механічного зносу. Швидкість 60 об/хв;

- тривалість: 10 хв.

4. Проведення імітації зношування:

- запуск симулятора;

- спостереження;

- завершення.

5. Аналіз після імітації:

- візуальний огляд;

- мікроскопічне дослідження;

- електричні випробування.

Для імітація термічного зношення було проведено вплив у термоустановці, яка підтримує підвищення і зменшення температури до відповідних температурних умов.

Так, методологія передбачає вимірювання електричних властивостей до проведення термоциклів [159]. Термоцикли мають такі параметри:

- нагрівання – 10 циклів, +60 градусів за Цельсієм, тривалість циклу 30 хв;
- охолодження – 10 циклів, -40 градусів за Цельсієм, тривалість циклу 30 хв.

Випробування проводились на установці Tabai Espec MC-71 Mini Subzero [161], призначеній для проведення випробувань в умовах навколишнього середовища з широким діапазоном температур і вологості.

Основні параметри установки:

- діапазон температур: від -70 °C до +100 °C;
- точність регулювання температури: $\pm 0,3$ °C;
- метод охолодження: механічне охолодження;
- спосіб нагрівання: електричний нагрівач.

Після закінчення проведення термоциклів відбувається контрольне вимірювання електричних властивостей, а також мікроскопічне дослідження поверхні нанесених доріжок.

2.9 Загальний алгоритм дослідження

Для виконання завдань дослідження обрано вищезазначені методи дослідження, а послідовність експериментів зазначено в алгоритмі на рис. 2.7.

Із метою визначення придатності різних типів паперу для різних технологій нанесення, а також аналізу варіантів режимів поверхневої обробки коронуванням було проведено підготовку відповідних зразків, їхнє подальше коронування, нанесення контактних доріжок і вимірювання електричних параметрів доріжок.

Відповідно до поставлених завдань, було досліджено поверхню паперових основ, які поділено на групи зразків. До однієї групи буде застосовано обробку поверхні для покращення адгезійних властивостей. За гіпотезою, це має покращити параметри електропровідності надрукованого шаблону.

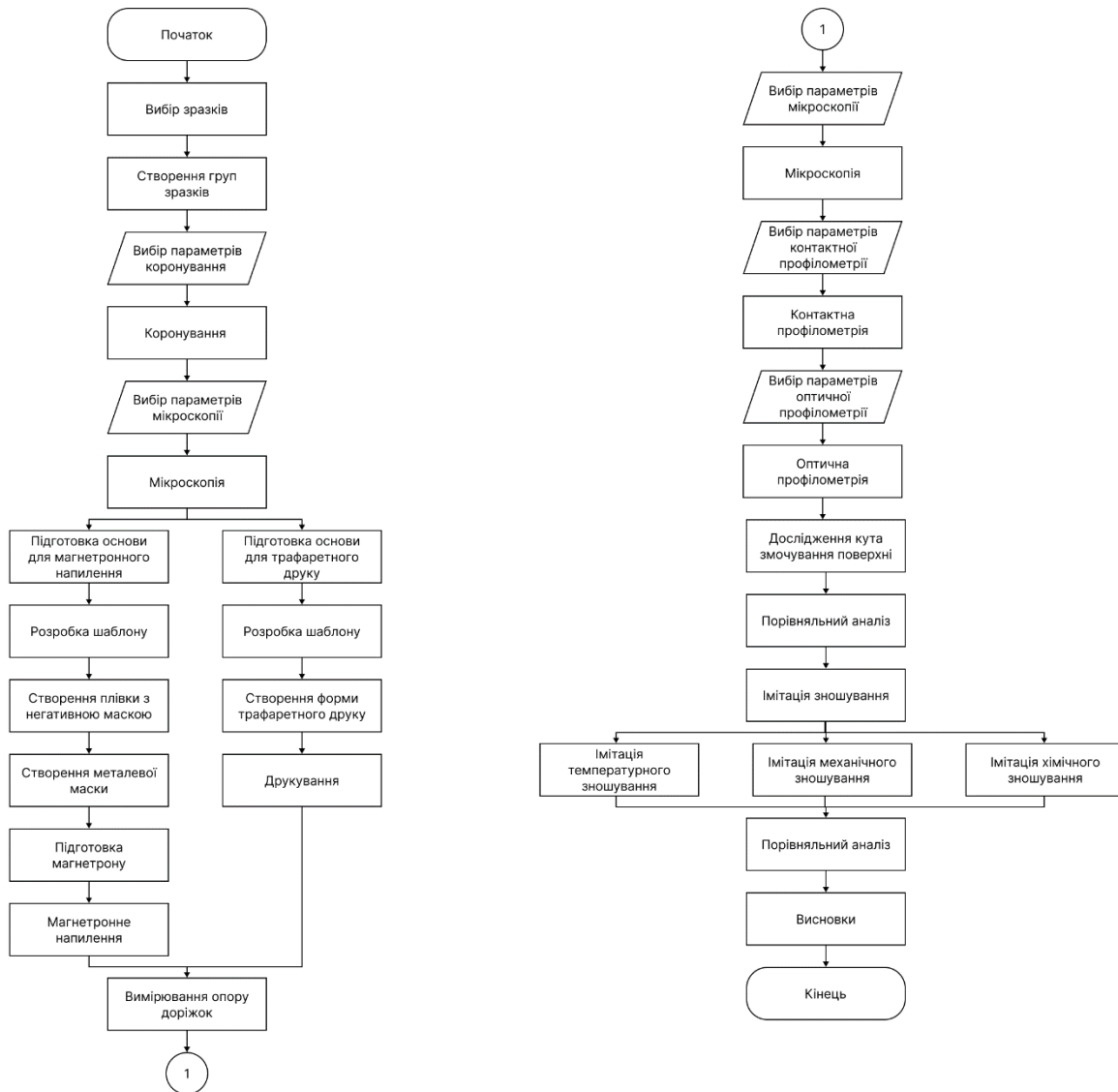


Рис. 2.7. Алгоритм проведення дослідження впливу обробки поверхні паперової основи на показники готового виробу друкованої електроніки

2.10 Висновки до другого розділу

1. Розроблено послідовний алгоритм проведення експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення впливу попередньої обробки паперової основи на адгезійні властивості струмопровідної фарби та електрофізичні характеристики надрукованих доріжок. Методологію дослідження побудовано з урахуванням системного підходу, що забезпечує відтворюваність та точність отриманих результатів.

2. Відібрано матеріали та підготовлено експериментальні зразки на основі двох типів паперу – глянцевого та матового. Кожен тип поділено на підгрупи, що зазнають попередньої поверхневої обробки коронним розрядом або залишаються необробленими для порівняння. Режими обробки (потужність і швидкість подавання основи) варіювались для встановлення оптимальних параметрів модифікації поверхні.

3. Розроблено технологічні процеси формування провідних доріжок: трафаретний друк із використанням спеціалізованих паст та тонкоплівкове осадження металів (Al, Cr, Ti) методом магнетронного розпилення. Такий підхід дозволив порівняти сумісність різних технологій нанесення з паперовими основами.

4. Для оцінювання морфологічних властивостей поверхні та надрукованих структур розроблено комплекс експериментальних методів: контактну та оптичну профілометрію, оптичну мікроскопію з визначенням параметрів шорсткості (R_a) і дослідженням топографічних особливостей поверхні після обробки.

5. Розроблено методику дослідження експлуатаційних властивостей надрукованих провідних доріжок з урахуванням запропонованого механізму формування зношеності інтелектуальної упаковки. Методику імітації зношування удосконалено проведенням випробувань, що включали механічне стирання та термоциклювання в кліматичній камері Tabai Espec MC-71 Mini Subzero у діапазоні температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вимірювання електропровідності до і після кожного етапу впливу виконувалися за допомогою цифрового мультиметра, що дало змогу оцінити стабільність та довговічність сформованих провідних шарів.

6. На основі результатів аналізу механізмів зношування встановлено, що для виробів з паперовими основами переважають комбіновані механізми деградації: механічне стирання, фретингове та хімічне зношення, що підтверджується структурними змінами як провідного шару, так і самої основи. Систематизація видів пошкоджень та механізмів впливу дала змогу окреслити основні напрямки для підвищення довговічності струмопровідних елементів шляхом оптимізації режимів попередньої обробки та вибору матеріалів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОВЕРХНІ ПАПЕРОВИХ ОСНОВ ТА ЯКОСТІ СТРУМОПРОВІДНИХ ШАРІВ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

3.1 Дослідження електрофізичних властивостей струмопровідних доріжок

Дослідження проведено щодо груп зразків М0, М1000, М3000, Г0, Г1000, Г3000 з нанесеним магнетронним напиленням струмопровідних доріжок.

У табл. 3.1 зображено середні значення вимірів опору по кожній групі зразків і ширині доріжок.

Таблиця 3.1. Середні значення опору доріжок відповідно до ширини доріжки в групі зразків

Група зразків – Алюміній без підшару						
Ширина контактної доріжки, мм		1	2	3	4	5
М0	Середнє значення, Ом	32,76	14,60	8,26	6,13	4,30
М1000	Середнє значення, Ом	85,80	13,10	8,20	6,43	4,36
М3000	Середнє значення, Ом	62,70	24,40	12,53	9,86	8,93
Г0		-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	47,40	16,00	10,26	12,66	18,16
Г3000	Середнє значення, Ом	-	-	4,80	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром титану						
Ширина контактної доріжки, мм		1	2	3	4	5
М0	Середнє значення, Ом	22,10	8,00	9,26	7,66	9,10
М1000	Середнє значення, Ом	34,10	16,70	-	9,63	7,46
М3000	Середнє значення, Ом	27,73	32,13	9,36	-	-
Г0	Середнє значення, Ом	131,40	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	56,26	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	69,40	72,13	-	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром хрому						
Ширина контактної доріжки, мм		1	2	3	4	5
М0	Середнє значення, Ом	141,83	33,10	11,83	10,80	8,16
М1000	Середнє значення, Ом	18,46	9,00	4,83	3,80	3,80
М3000	Середнє значення, Ом	10,80	4,76	2,43	1,93	2,76
Г0	Середнє значення, Ом	54,60	24,03	30,36	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	106,40	41,86	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	23,10	17,63	-	-	-

Відповідно до отриманих даних по кожному із обраних параметрів ширини струмопровідної доріжки обиралось найменше значення опору, яке є еталонним

значенням. Обрані значення наведено в табл. 3.2. Також для отриманих значень розраховано питомий поверхневий опір.

Таблиця 3.2. Обрані середні значення опору

Ширина доріжки, мм	Опір, Ом	Поверхневий опір, Ом/кв	Основа, режим обробки, нанесений матеріал
1	10,80	0,18	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
2	4,76	0,15	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
3	2,43	0,12	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
4	1,93	0,12	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
5	2,76	0,23	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому

На основі еталонних значень розраховано дельту різниці середніх значень для кожної основи, нанесеного матеріалу та ширини доріжки. Відповідні значення наведено в діаграмах на рис. 3.1 – 3.2.

Слід зазначити, що значення, наведені на діаграмах (рис. 3.1 – 3.2), відображають відносну різницю між середніми значеннями електричного опору струмопровідних доріжок, обраними як еталонні для відповідних груп основ. Побудова довірчих інтервалів для наведених величин не здійснювалась, оскільки вони є похідними від середніх значень і не представляють безпосередньо вимірювану випадкову величину з власною вибіркою. При цьому середні значення опору, використані для розрахунку відносної різниці, були отримані на основі серії експериментальних вимірювань та піддавались статистичній обробці на етапі формування еталонних значень.

Середні значення опору для матового паперу з режимом обробки 3000 Вт та з підшаром хрому продемонстрували найменші значення для всіх ширин струмопровідних доріжок у межах дослідження.

Серед інших груп матовий папір з режимом обробки 1000 Вт та з підшаром хрому також демонструє найменшу різницю від обраного еталонного значення.

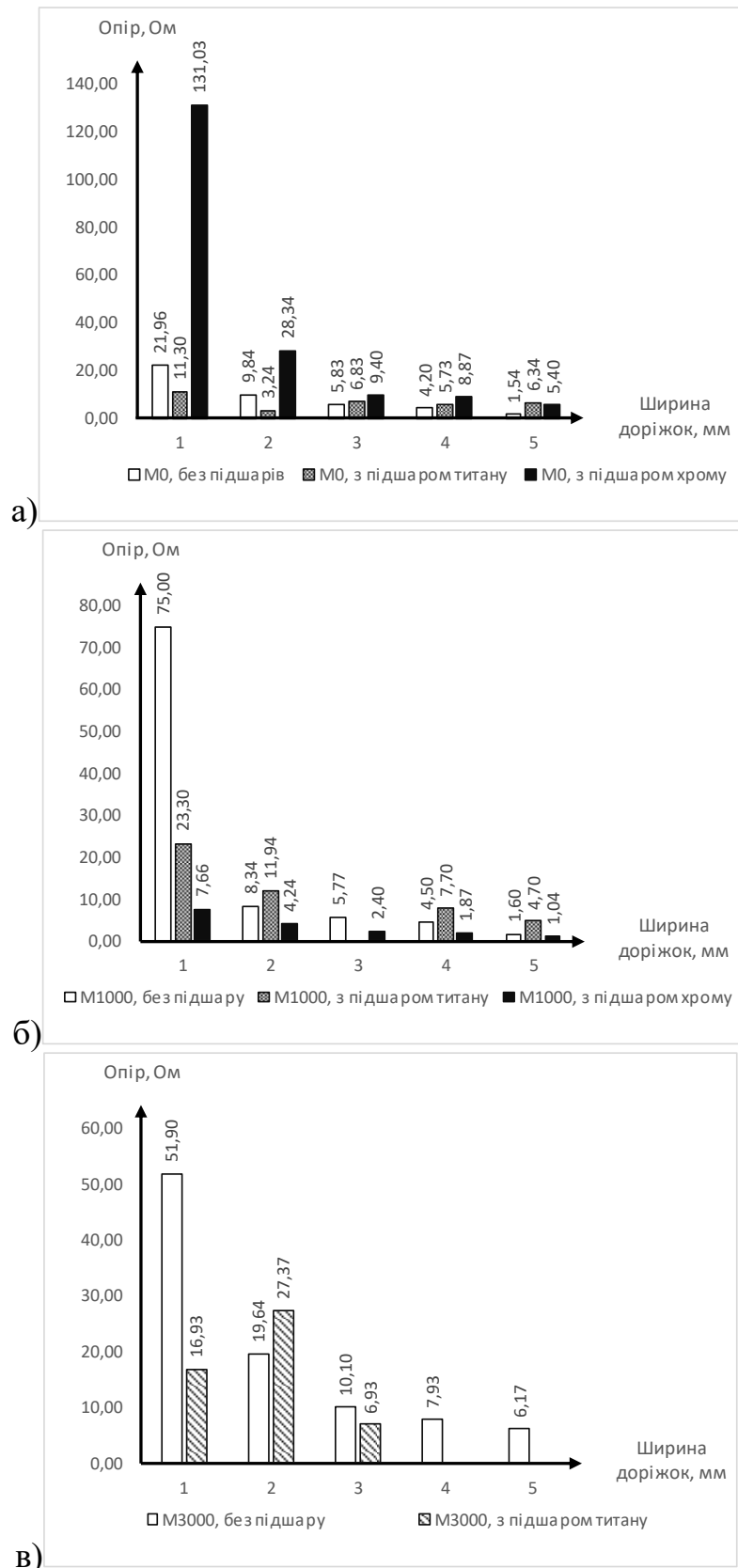


Рис. 3.1. Відносна різниця середнього опору доріжок порівняно з обраним еталоном груп основ: а) M0; б) M1000; в) M3000

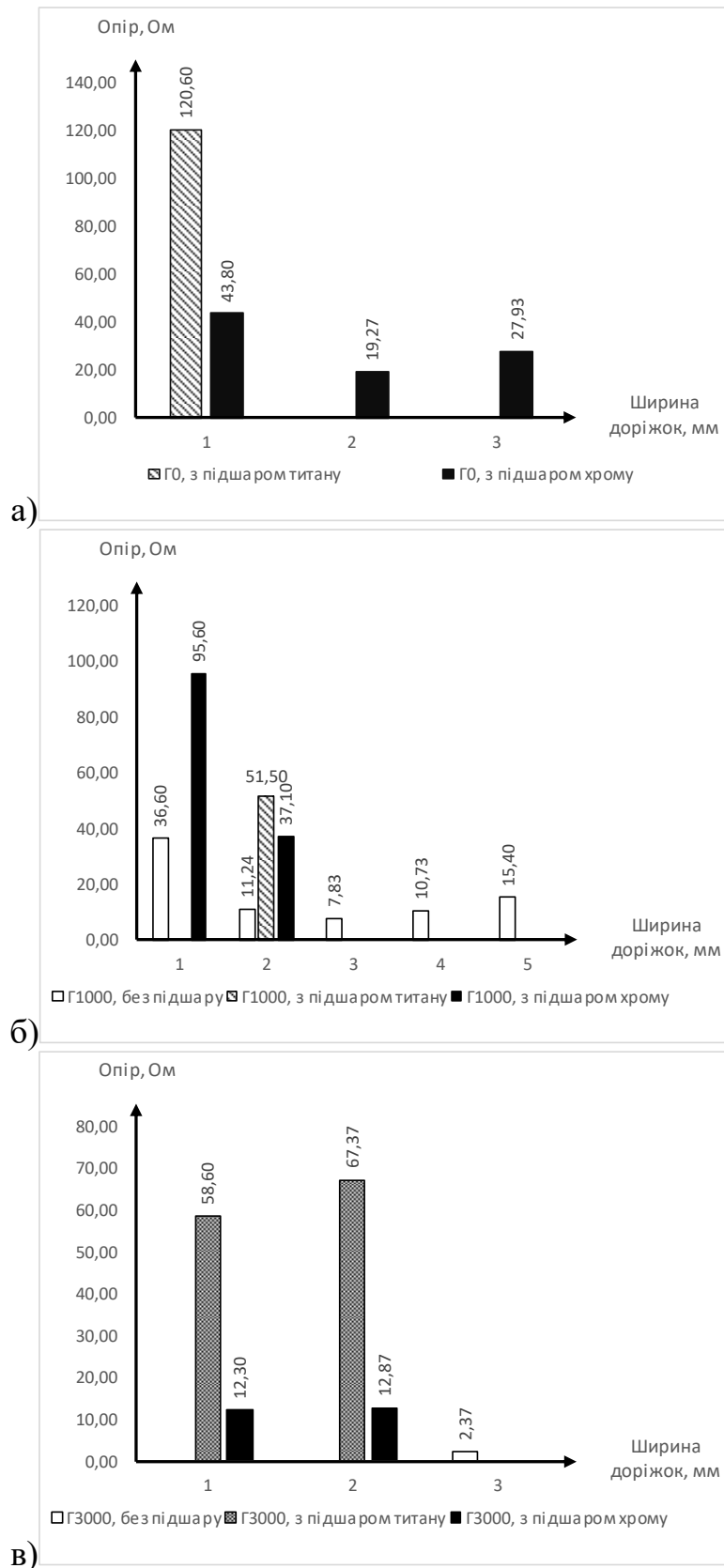


Рис. 3.2. Відносна різниця середнього опору доріжок порівняно з обраним еталоном груп основ: а) Г0; б) Г1000; в) Г3000

Серед інших комбінацій основи та матеріалу, що наноситься: група матового паперу з режимом обробки 1000 Вт з підшаром титану, група матового паперу з режимом обробки 3000 Вт з підшаром титану, група глянцевого паперу без обробки без підшарів, групи глянцевого паперу з підшаром титану з обробкою та без і групи глянцевого паперу з підшаром хрому з обробкою та без – виявлено такі явища:

- контакту на струмопровідній доріжці нема;
- брак стабільних показників при серії вимірювань у межах похибки;
- зависокі та нестабільні показники опору порівняно з аналогічними

вимірюваннями в інших групах.

Отже, глянцева папір показує найбільш стабільний опір при обробці коронним розрядом потужністю 1000 Вт, без використання підшарів. Матовий папір демонструє нижчий опір, особливо при обробці 1000 Вт і 3000 Вт, а також використанні підшару хрому.

Для оцінювання стабільності провідних властивостей та виявлення аномальних значень усі результати вимірювання опору були піддані статистичній обробці із розрахунком середнього значення (\bar{x}) та середньоквадратичного відхилення (s). Значення, що виходили за межі інтервалу $(\bar{x}) \pm 2s$, вважались викидами та виключались із розрахунку скоригованих середніх значень.

Проведена обробка показала, що у 29 з 30 комбінацій (6 груп \times 5 ширин) значення опору знаходиться у межах допустимого статистичного розкиду. Винятком є лише один викид у групі Г0 для ширини 2 мм (табл. 3.3). Це підтверджує високу повторюваність процесу нанесення покриття та брак систематичних технологічних похибок.

Таблиця 3.3. Результати статистичного аналізу

Група	Ширина доріжки, мм	\bar{x} , Ом	s , Ом	Інтервал $(\bar{x}) \pm 2s$, Ом	Значення викидів
Г0	2	542,33	136,71	[268.91; 815.75]	826

Після виключення одиничних викидів усі значення середнього опору були перераховані. Зниження середнього опору найбільш чітко простежується в групі М3000

для доріжок шириною 1–2 мм. Це свідчить про ефективну стабілізацію структури провідного шару при попередній обробці матової основи. Результати проведеного нами дослідження надрукованих трафаретним друком струмопровідних доріжок наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Результати вимірювань опору доріжок відповідно до ширини

Група зразків	5 мм	4 мм	3 мм	2 мм	1 мм
Г0	169,2	219,2	319,5	516,5	1353,8
Г1000	176,3	220,3	316,3	523,1	1280,6
Г3000	161,1	218,3	310,1	507,5	1275,8
М0	184,0	248,6	346,7	589,8	1447,1
М1000	181,9	234,8	319,8	520,3	1232,4
М3000	161,1	201,1	267,5	425,1	1035,6

Відповідно до отриманих даних по кожному із обраних параметрів ширини струмопровідної доріжки обиралось найменше значення опору, яке є еталонним значенням. Обрані значення наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Обрані значення опору

Ширина доріжки, мм	Опір, Ом	Основа, режим обробки
1	1035,6	Матовий папір, 3000 Вт
2	425,1	Матовий папір, 3000 Вт
3	267,5	Матовий папір, 3000 Вт
4	201,1	Матовий папір, 3000 Вт
5	161,1	Матовий і глянцевого папір, 3000 Вт

Для валідації результатів було розраховано поверхневий опір за формулою 2.1 (табл. 3.6).

Вимірний поверхневий опір друкованих доріжок шириною 1–5 мм знаходиться в діапазоні до 1000 Ом, заявленому виробником графенових чорнил (таблиця 2.4, технічна специфікація, ІЕС 60093:1980).

Таблиця 3.6. Поверхневий опір струмопровідних доріжок у межах обраних еталонних значень

Ширина доріжки, мм	Поверхневий опір, Ом/кв
1	17.260
2	14.170
3	13.375
4	13.406
5	13.425

Відповідно до гравіметричного методу було вираховано приблизну середню товщину фарбового шару, яка склала 3,0549 мкм.

Середні значення опору для матового паперу з режимом обробки 3000 Вт продемонстрували найменші значення для всіх ширин струмопровідних доріжок у межах дослідження.

Серед інших груп також варто зазначити, що глянцевого папір із режимом обробки 3000 Вт демонструє найменшу різницю від обраного еталонного значення.

Матовий папір із режимом обробки 1000 Вт демонструє меншу різницю при ширині 1–2 мм.

Отже, матовий папір із режимом обробки 3000 Вт демонструє нижчий опір, що зокрема корелюється з попередніми дослідженнями [11], де використання матового паперу з режимом обробки 3000 Вт було найбільш ефективним. Це показує, що обробка є сприятливою для обох способів нанесення, а отже може бути ефективною і при інших методах нанесення, що можливо з'ясувати при подальших дослідженнях.

Також варто зазначити, що, на відміну від магнетронного напилення в попередніх дослідженнях, доріжки нанесені трафаретним друком показали більшу стабільність електрофізичних властивостей, а також вищу зносостійкість в лабораторних умовах, що потребує додаткового обґрунтування.

Для оцінювання технологічної ефективності обраних методів формування провідних шарів було проведено порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних із результатами релевантних досліджень, представлених у світовій науковій періодиці. На рис. 3.12 наведено порівняльну гістограму значень R_s для власних зразків

та показників, зафіксованих у роботах інших дослідників для аналогічних основ [162–167].

При формуванні порівняльної характеристики, наведеної на рис. 3.3, для кожної з досліджуваних груп зразків було виконано серію експериментальних вимірювань електричного опору з подальшою статистичною обробкою результатів та визначенням середніх значень. Для подальшого зіставлення було обрано репрезентативні групи з найкращими середніми електрофізичними показниками, за якими розраховано поверхневий опір струмопровідних шарів. Значення, представлені на діаграмі, є узагальненими еталонними характеристиками, отриманими на основі попередньо статистично оброблених даних, у зв'язку з чим побудова довірчих інтервалів для наведених величин не здійснювалась. Наведене представлення результатів має на меті порівняльну інженерну оцінку ефективності методів формування провідних шарів, а не статистичний аналіз розподілу експериментальних даних.

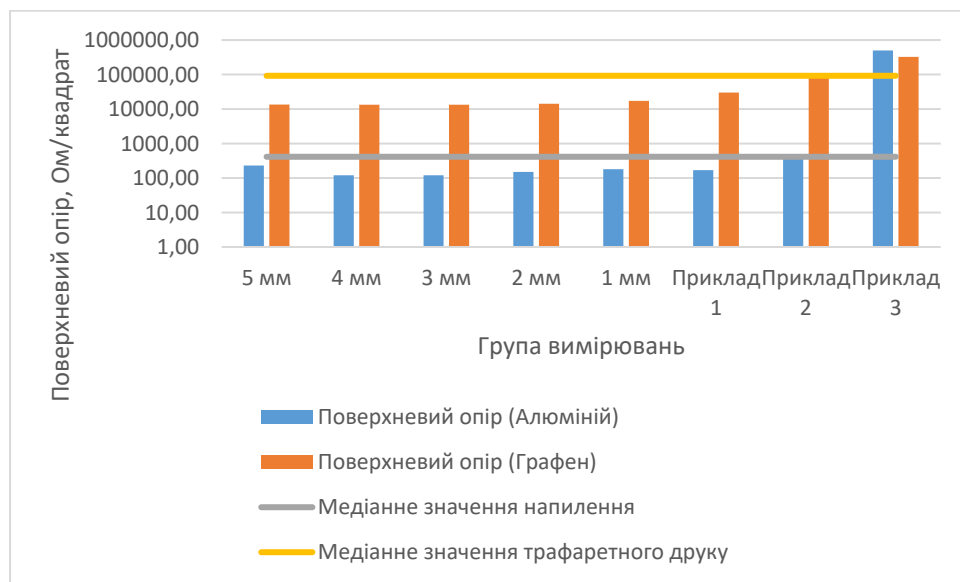


Рис. 3.3. Порівняльна характеристика поверхневого опору провідних шарів, отриманих методами магнетронного напилення алюмінію та трафаретного друку графеновими чорнилами порівняно зі світовими відомими аналогами

З огляду на значний діапазон значень поверхневого опору R_s , який охоплює кілька порядків (від часток одиниці до сотень Ом/кв), для візуалізації даних було використано логарифмічний масштаб. Це дало змогу коректно зіставити як високопровідні металеві плівки, отримані магнетронним напиленням, так і композитні графенові шари, нанесені методом трафаретного друку.

3.2 Дослідження стану поверхні основи та нанесеного матеріалу

На рис. 3.4–3.5 представлено середні значення параметрів R_a та R_z для різних зразків паперу, вимірних вздовж і впоперек машинного напрямку. Зразки було взято з центральної частини аркуша, що проходив обробку. Обробка коронним розрядом загалом сприяє збільшенню середньої шорсткості поверхні.

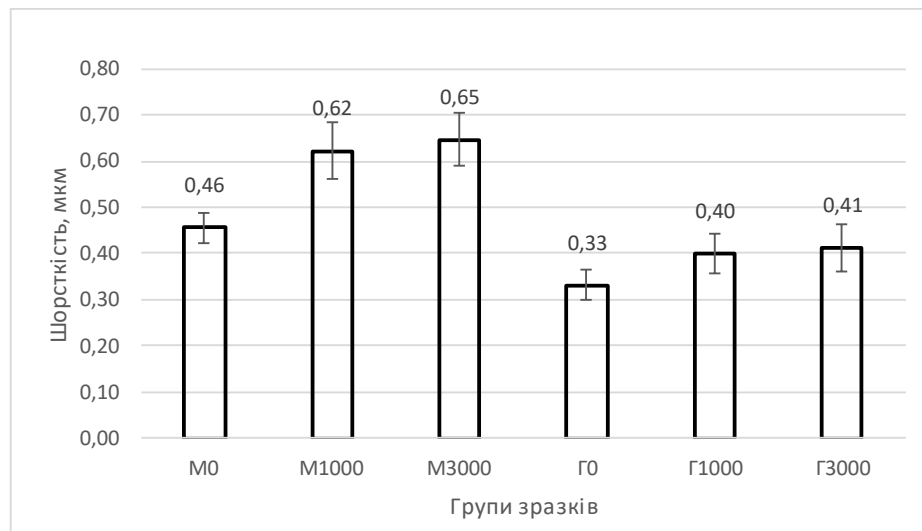


Рис. 3.4. Середнє значення показника R_a , групи: M0 – матовий папір без обробки, M1000 – матовий папір, обробка 1000Вт, M3000 – матовий папір, обробка 3000Вт, Г0 – глянцевий папір без обробки, Г1000 – глянцевий папір, обробка 1000Вт, Г3000 – глянцевий папір, обробка 3000Вт

Із рис. 3.3 видно, що середнє значення R_a в групі зразків M3000 є найбільшим порівняно з усіма іншими дослідженими варіантами. Це може свідчити про модифікацію поверхні внаслідок обробки коронним розрядом саме при потужності 3000 Вт.

На рис. 3.6 представлено приклади зареєстрованих тривимірних топографій поверхонь зразків та двовимірні топографії з відповідними профілями які відповідають положенню маркеру.

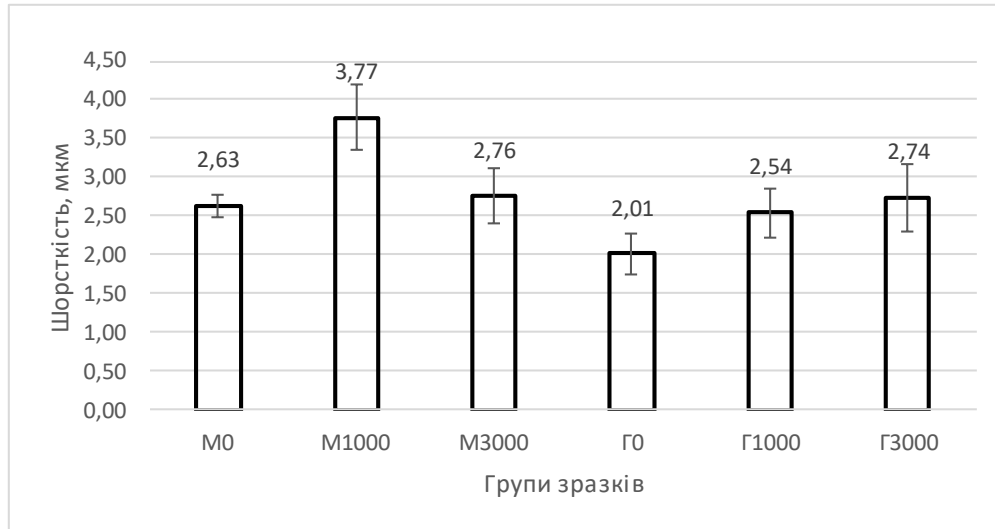


Рис. 3.5. Середнє значення показника R_z , групи: M0 – матовий папір без обробки, M1000 – матовий папір, обробка 1000Вт, M3000 – матовий папір, обробка 3000Вт, Г0 – глянцевий папір без обробки, Г1000 – глянцевий папір, обробка 1000Вт, Г3000 – глянцевий папір, обробка 3000Вт

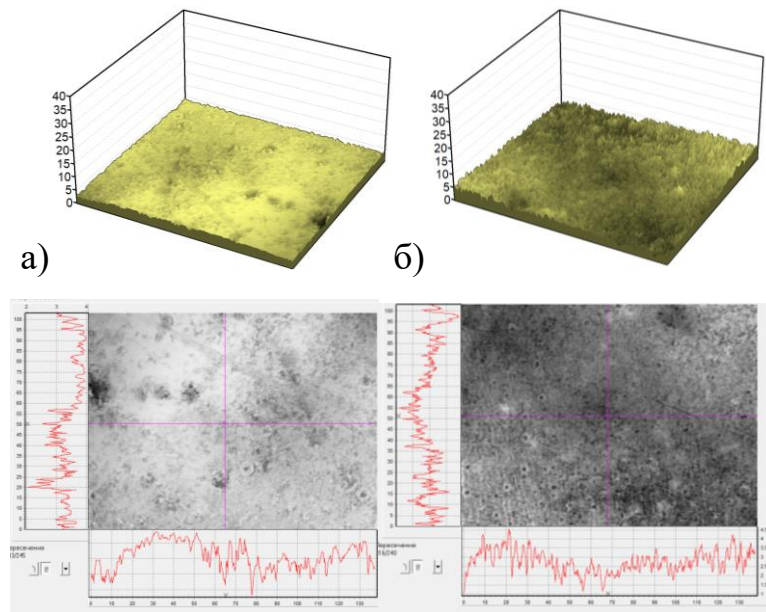


Рис. 3.6. Приклади тривимірних і двовимірних топографій поверхні основ для груп: а) M0, б) Г0

Результати вимірювання шорсткості оптичної профілометрії поверхні основи в межах груп випробувань зображено на рис. 3.7–3.9.

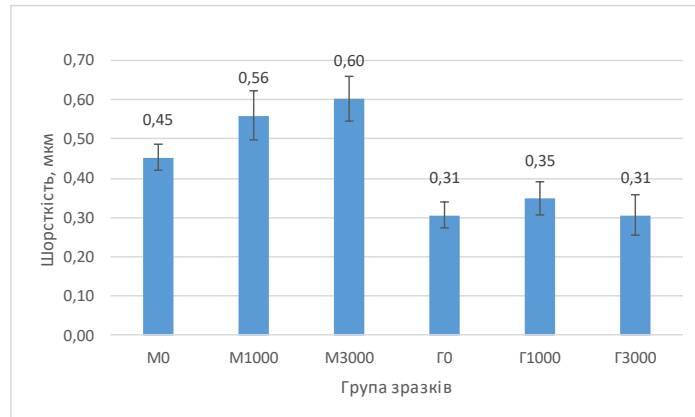


Рис. 3.7. Шорсткість поверхні R_a груп основ матових (М) і глянцевих (Г) зразків, без обробки (0), та при режимах обробки коронним розрядом 1000 та 3000 Вт

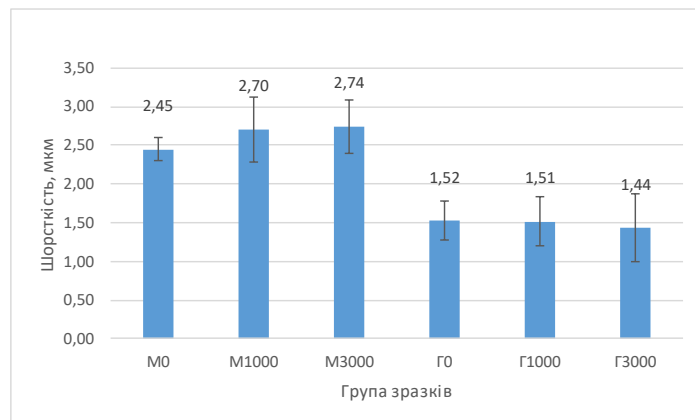


Рис. 3.8. Шорсткість поверхні R_z груп основ матових (М) і глянцевих (Г) зразків, без обробки (0), та при режимах обробки коронним розрядом 1000 та 3000 Вт

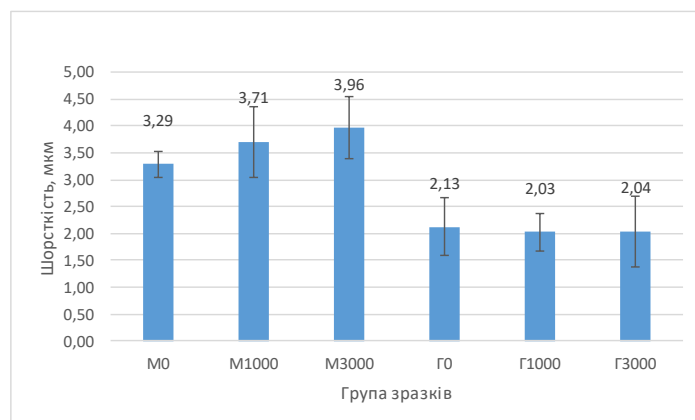


Рис. 3.9. Шорсткість поверхні R_{max} груп основ матових (М) і глянцевих (Г) зразків, без обробки (0), та при режимах обробки коронним розрядом 1000 та 3000 Вт

Для візуального оцінювання поверхні проведено дослідження за допомогою оптичної мікроскопії. Приклади представлено на рис. 3.10–3.11.

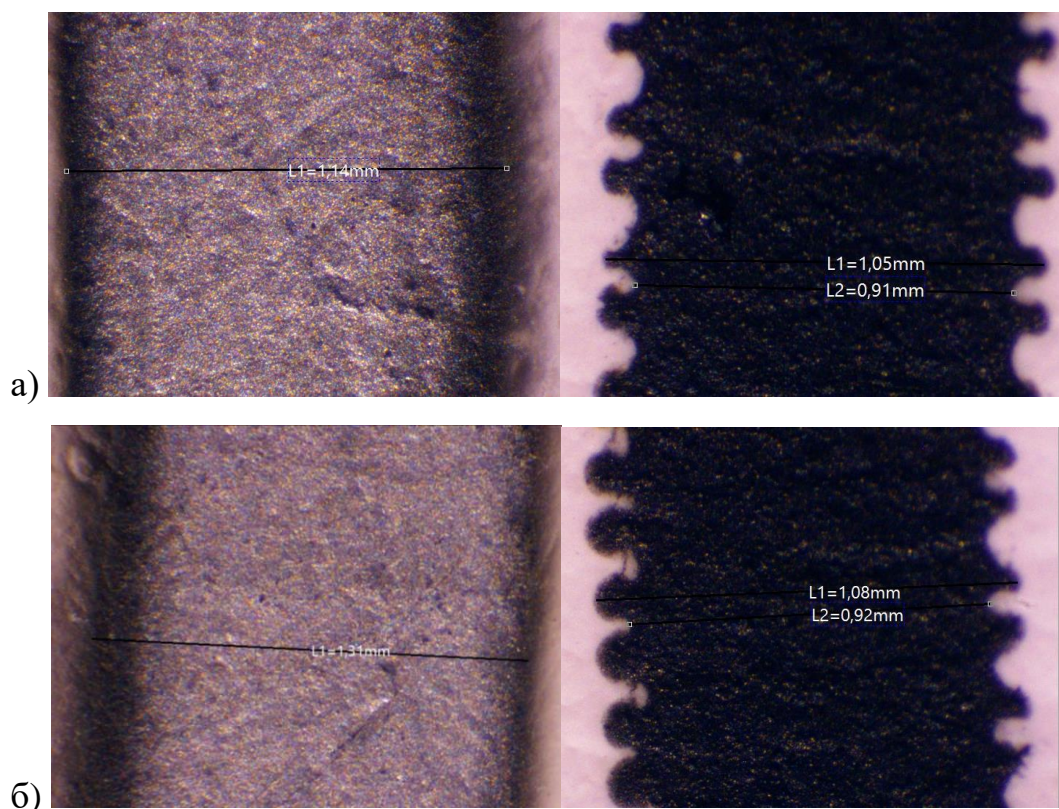


Рис. 3.10. Мікрофотографії нанесеного провідного матеріалу – алюмінію та графену, на основи матового паперу для режимів обробки: а) без обробки; б) 3000 Вт

Оптичні мікроскопічні дослідження поверхні паперових основ та нанесених провідних матеріалів для зразків усіх досліджуваних груп (М0, М1000, М3000, Г0, Г1000, Г3000) не виявили суттєвих візуальних змін структури поверхні паперу після обробки коронним розрядом у використаному діапазоні потужностей. Для паперових основ як матової, так і глянцевої груп характерною залишалась типова волокниста структура без появи макродефектів, локальних руйнувань або ознак деградації поверхневого шару.

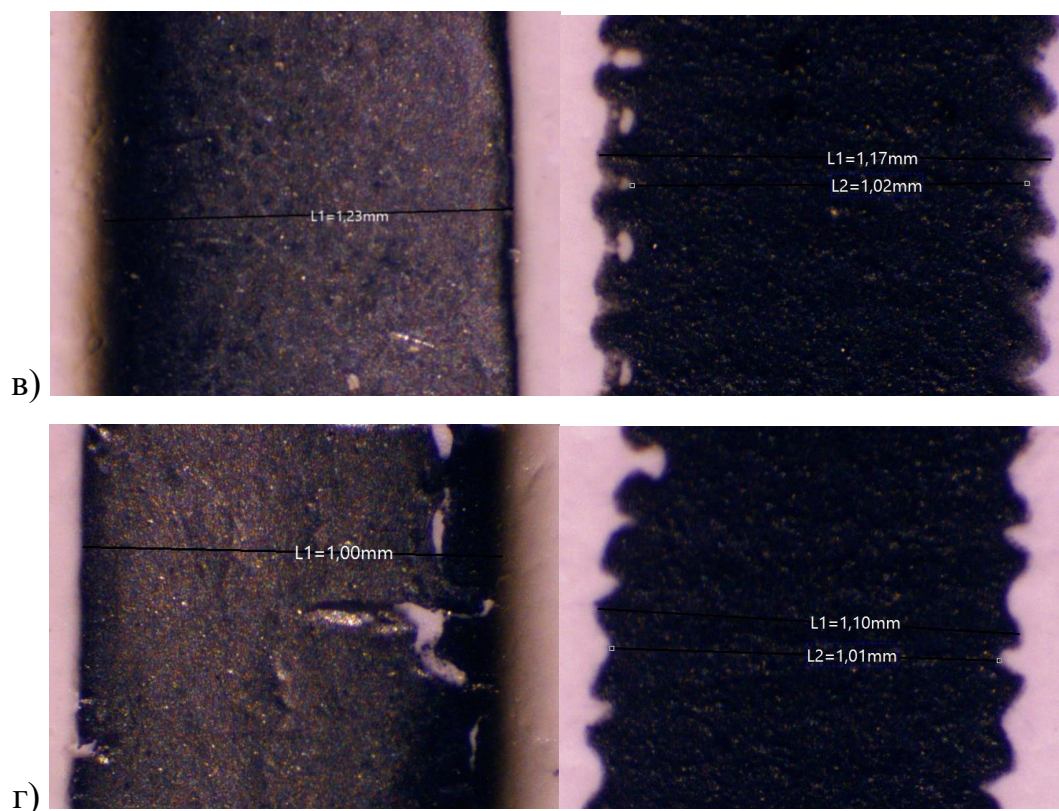


Рис. 3.11. Мікрофотографії нанесеного провідного матеріалу – алюмінію та графену, на основи глянцевого паперу для режимів обробки в) без обробки; г) 3000 Вт

Для зразків із матеріалом, нанесеним методом магнетронного напилення, спостерігалось відтворення рельєфу паперової основи з наявністю дрібних нерівностей, що є характерним для тонкоплівкових покриттів на пористих основах. При цьому для зразків, оброблених коронним розрядом, візуально відзначалась тенденція до більш рівномірного розподілу матеріалу на поверхні порівняно з необробленими основами, без формування суцільних дефектних ділянок або агломератів.

Поверхня струмопровідних доріжок, сформованих методом трафаретного друку, у всіх групах зразків також не демонструвала візуально виражених відмінностей, що свідчить про стабільність геометрії доріжок і відсутність макроскопічних порушень структури провідного шару. Виміряні лінійні розміри доріжок перебували в межах заданих значень, а крайові зони характеризувалися типовою для трафаретного друку формою без ознак розшарування або відшаровування матеріалу.

Загалом результати оптичної мікроскопії підтверджують, що обробка коронним розрядом не призводить до формування візуально помітних дефектів поверхні паперових основ і нанесених провідних шарів, а спостережувані зміни мають переважно мікроструктурний характер, що узгоджується з подальшими кількісними результатами профілометричних, електрофізичних та фрактальних досліджень.

У табл. 3.7 наведено виміри кутів змочування досліджуваних паперових основ після коронування при різних режимах обробки поверхні. На рис. 3.12 наведено репрезентативні мікрознімки кута змочування для кожної групи зразків.

Результати досліджень незадрукованих паперових зразків із глянцевою та матовою поверхнею продемонстрували закономірне зниження кута змочування після обробки коронним розрядом (рис. 3.13). Для необроблених зразків середнє значення становило $63,5^\circ$, а після обробки при 3000 Вт і 6000 Вт кут знижувався до $45,4^\circ$ і $41,9^\circ$ (глянцевий папір) та до $50,1^\circ$ і $47,3^\circ$ відповідно (матовий папір). Це вказує на підвищення гідрофільності внаслідок збільшення поверхневої енергії. Утім, при 8000 Вт встановлено незначне зростання кута, ймовірно спричинене деградацією поверхневого шару. Глянцеві зразки демонстрували менші значення кута після обробки, що підтверджує роль гладкої текстури у покращенні енергії змочування. Мікрознімки крапель підтверджують ці результати, демонструючи зменшення профілю краплі та її розтікання після активації.

Слід зазначити, що значення кута змочування, наведені на рис. 3.13, представлені у вигляді середніх значень, отриманих у межах серії експериментальних вимірювань, виконаних із використанням стандартної методики вимірювання кута змочування. Первинні експериментальні дані були попередньо статистично оброблені на етапі проведення вимірювань, після чого для подальшого аналізу використано усереднені значення, надані для обробки та інтерпретації. У зв'язку з цим результати на діаграмі відображають узагальнену залежність зміни кута змочування від режимів обробки паперових основ і мають порівняльний характер.

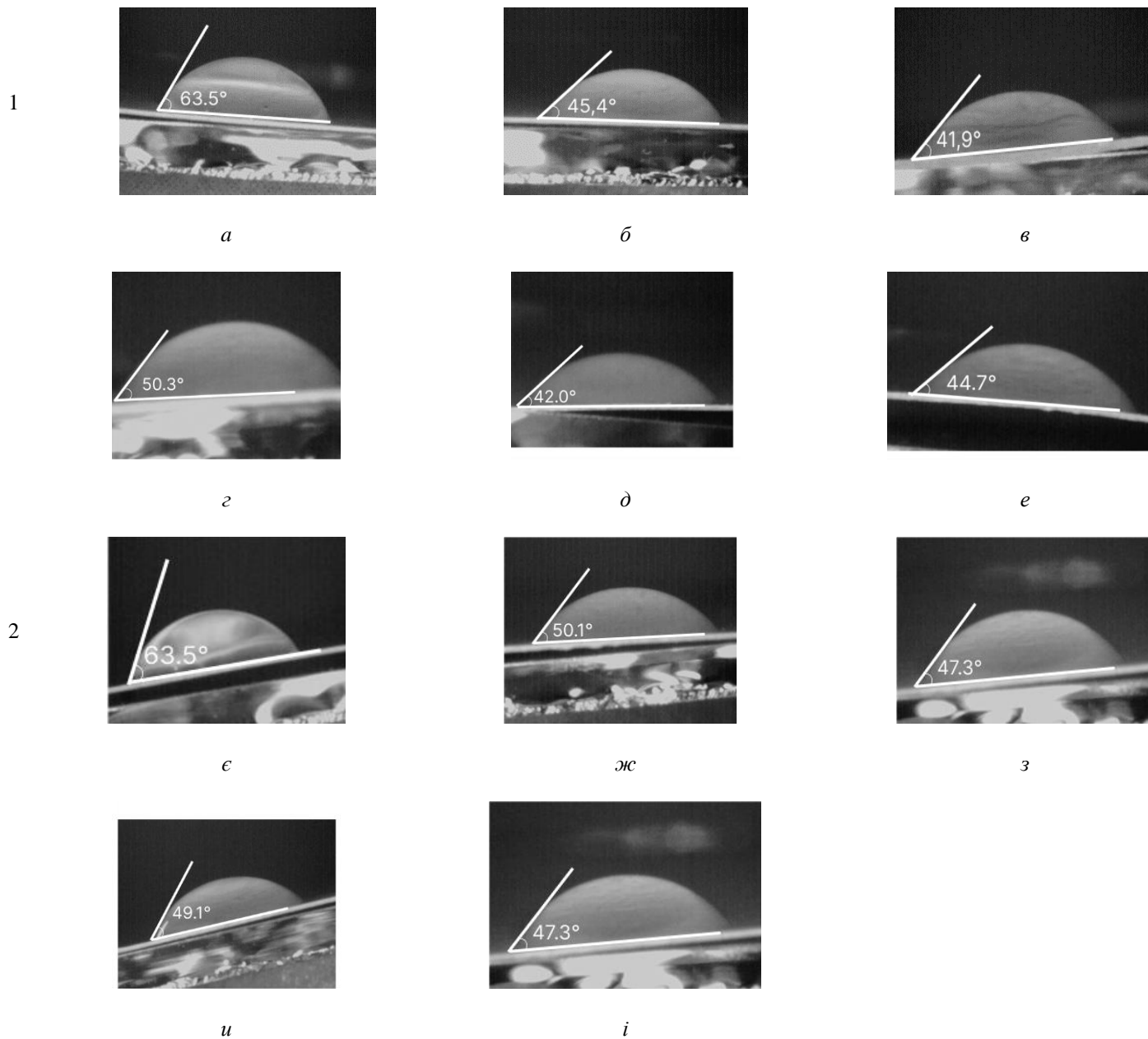


Рис. 3.12. Мікрофотографії кута змочування на паперових основах: а – глянце́вий папір, без обробки; б – глянце́вий папір, обробка 3000 Вт; в – глянце́вий папір, обробка 6000 Вт ; г – глянце́вий папір, обробка 1500 Вт; д – глянце́вий папір, обробка 4500 Вт; е – глянце́вий папір, обробка 8000 Вт; є – матовий папір, без обробки; ж – матовий папір, обробка 3000 Вт; з – матовий папір, обробка 6000 Вт; и – матовий папір, обробка 1500 Вт; і – матовий папір, обробка 4500 Вт

Таблиця 3.7. Результати експериментальних досліджень щодо кута змочування досліджуваних зразків після різних режимів коронної обробки поверхні

№	Досліджувані зразки	Кут змочування при різних режимах обробки поверхні, °				
		Без обробки	1500 Вт	3000 Вт	6000 Вт	8000 Вт
1	Папір крейдований Art-tech Gloss	63,5	50,3	45,4	41,9	44,7
2	Папір крейдований Art-tech Matt	63,5	62,2	50,1	47,3	41,7

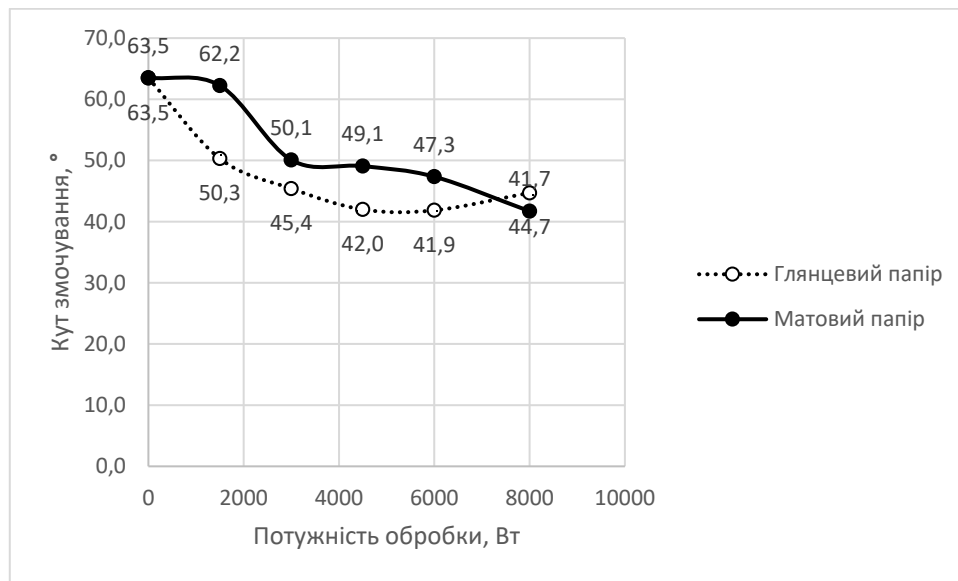


Рис. 3.13. Результати вимірювання кута змочування на паперових основах

Збільшення середньої шорсткості R_a після коронної обробки на 3000 Вт на 45 % супроводжується покращенням змочуваності на $13,4^\circ$ за кутом змочування, що також знизило питомий опір доріжок на 13 % для матового паперу при ширині доріжки у 5 мм. Збільшення середньої шорсткості R_a після коронної обробки на 3000 Вт на 24 % супроводжується покращенням змочуваності на $18,1^\circ$ за кутом змочування, що знизило питомий опір доріжок на 5 % для глянцевого паперу при ширині доріжки у 5 мм.

3.3 Випробовування зразків в умовах штучного зношування

Згідно з прийнятою методологією було здійснено дослідження електрофізичних характеристик нанесеного матеріалу на зразках після термічного, механічного та хімічного впливу.

3.3.1 Термоциклювання

Після вимірювань опору було проведено термоциклічні випробування, як один із типів випробувань зносостійкості продукції. Після проведення термоциклювання в кліматичній камері було знову проведено вимірювання опору. Результати вимірювання наведено на рис. 3.14–3.17.

На рис. 3.18–3.22 представлено зміну опору струмопровідних доріжок шириною 1–5 мм для шести груп зразків паперу (глянцевого та матового з різними режимами обробки), після проходження двох температурних циклів (нагрів до +60 °С та охолодження до -40 °С).

Загальна тенденція для більшості зразків демонструє зменшення електричного опору після першого циклу нагрівання, що пояснюється термічним впливом, який активізував процеси спікання провідних компонентів у складі графенової фарби. Під дією підвищеної температури частинки фарби ущільнюються, зменшується контактний опір між ними, що загалом покращує провідність надрукованої доріжки.

Найбільш виражений ефект спостерігається у зразків, які не проходили попередню обробку коронним розрядом (M0, Г0), де зниження опору після першого циклу було особливо помітним. У зразках із попередньою обробкою (особливо M3000 та Г3000) зміни були менш радикальними, оскільки початкове зчеплення та провідна структура вже мали підвищену якість.

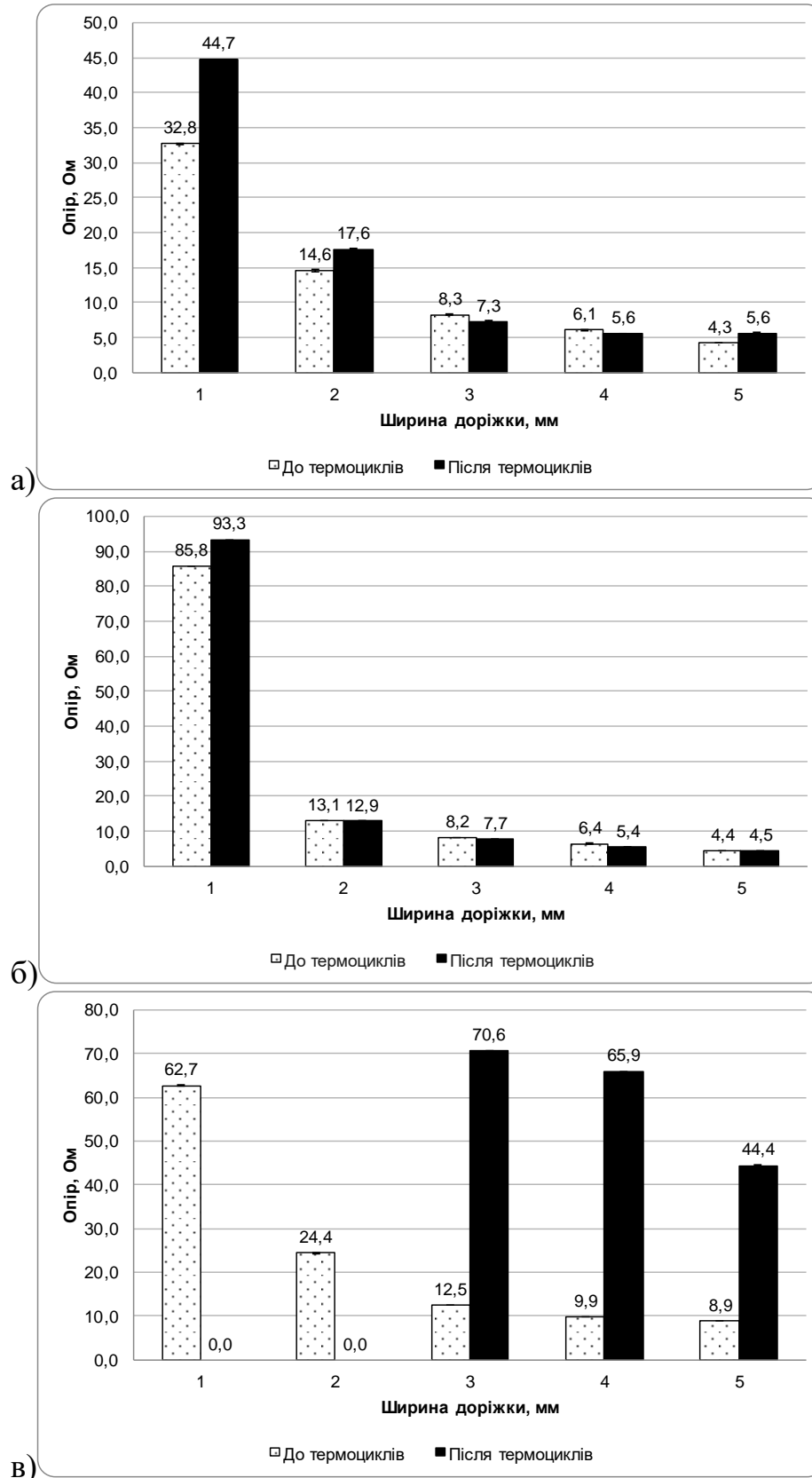


Рис. 3.14. Зміна опору в результаті термоциклів, для груп: а) M0, без підшару; б) M1000, без підшару; в) M3000, без підшару

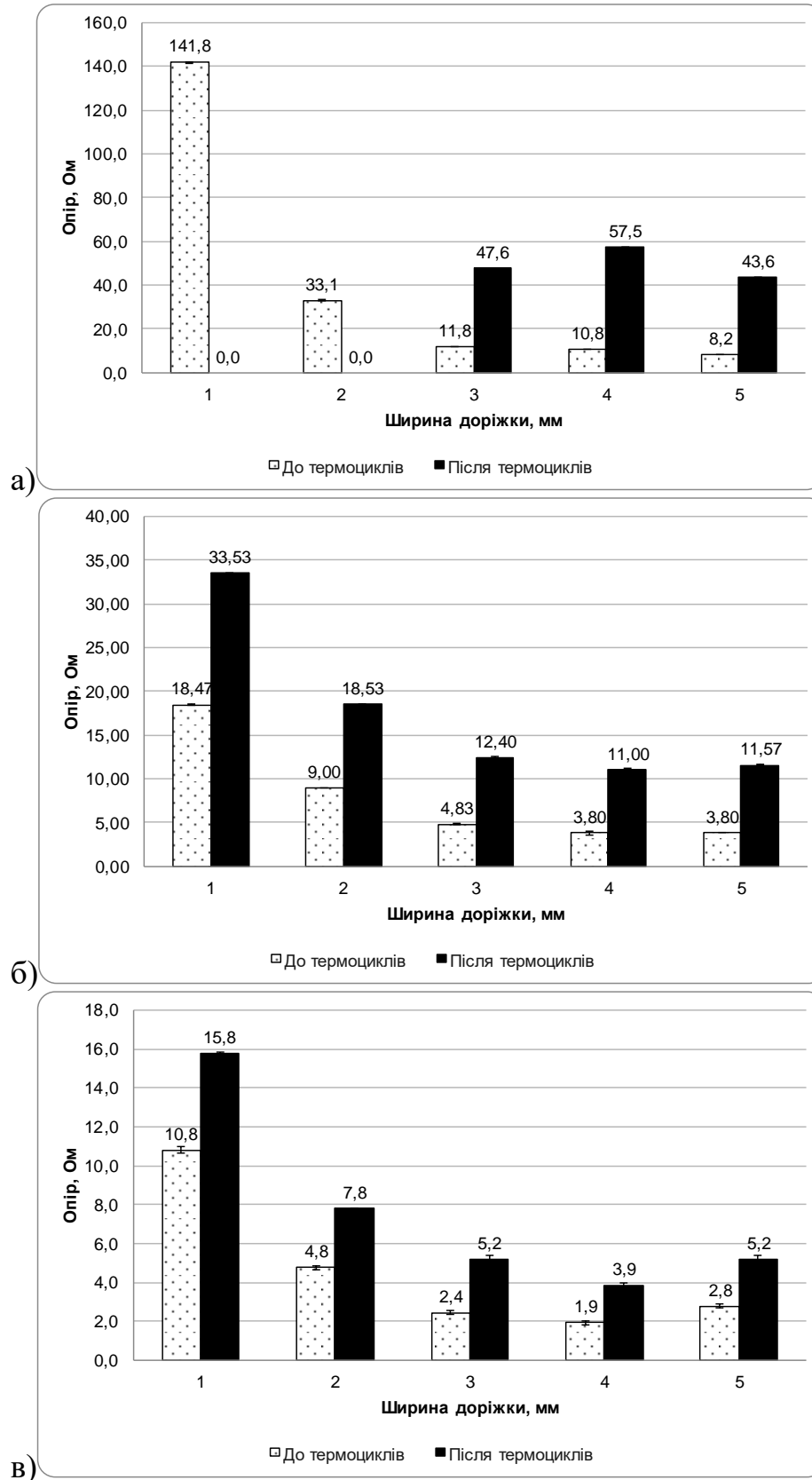


Рис. 3.15. Зміна опору в результаті термоциклів, для груп: а) M0, з підшаром хрому; б) M1000, з підшаром хрому; в) M3000, з підшаром хрому

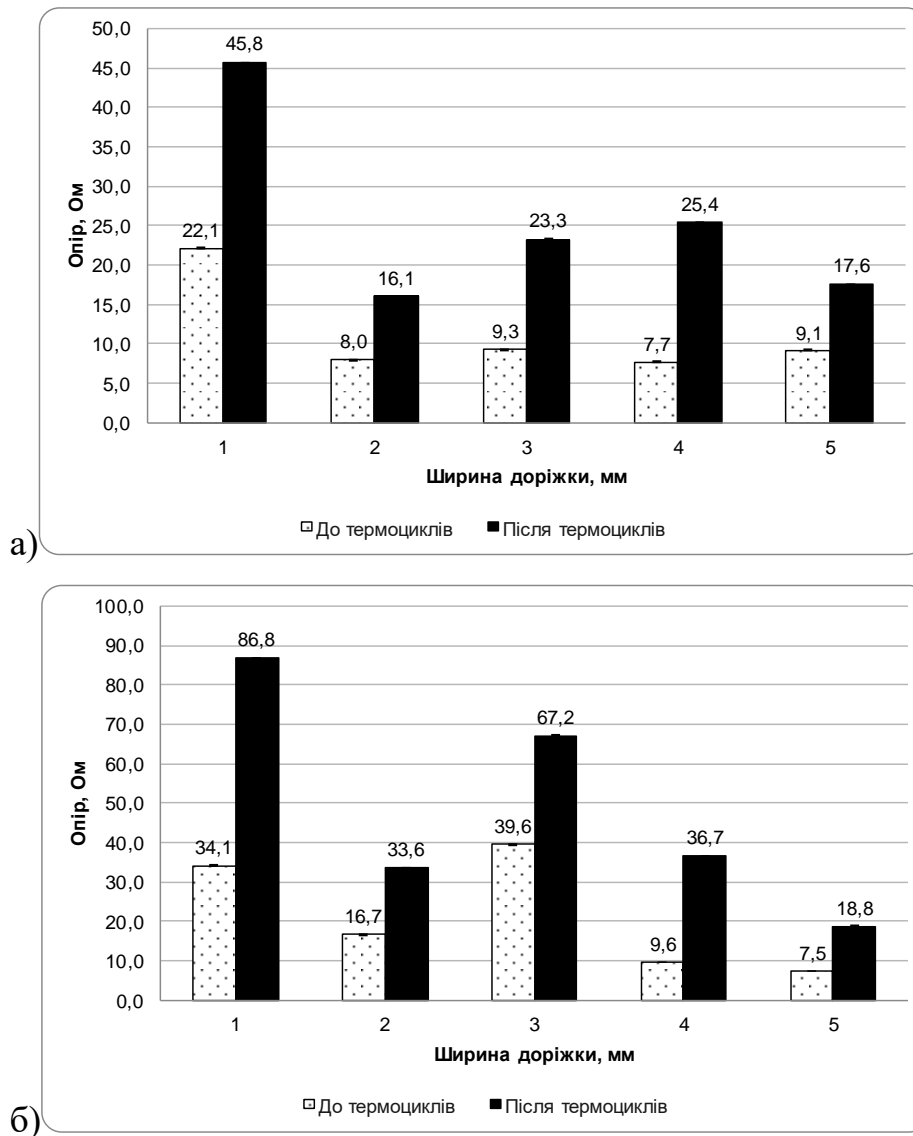


Рис. 3.16. Зміна опору в результаті термоциклів, для груп: а) M0, з підшаром титану; б) M1000, з підшаром титану

Після другого циклу опір у деяких випадках дещо зростає, що може бути наслідком формування мікротріщин або розшарування провідного шару. Проте здебільшого після першого циклу опір залишався стабільно нижчим за початковий рівень, що підтверджує позитивний ефект термічного впливу на стабілізацію провідної структури.

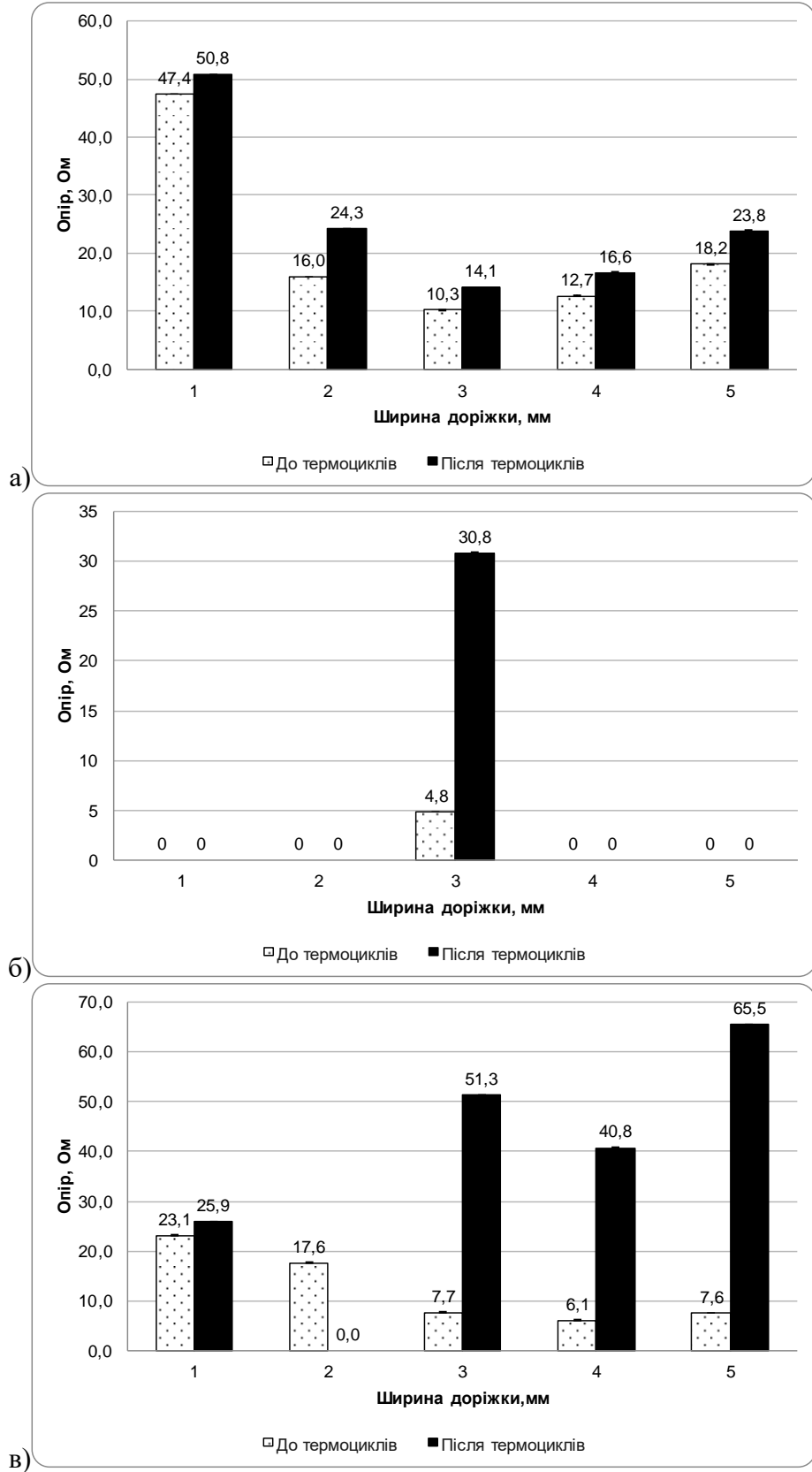


Рис. 3.17. Зміна опору в результаті термоциклів, для груп: г) Г1000, без підшару; д) Г3000, без підшару; з) Г3000, з підшаром хрому

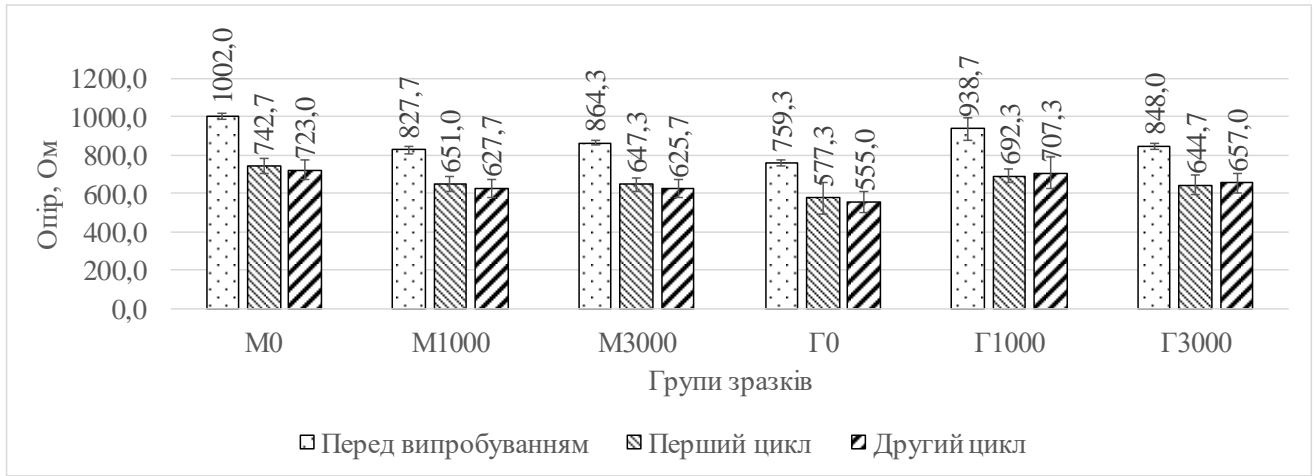


Рис. 3.18. Середнє значення зміни опору після термічних випробувань для всіх груп зразків (для ширини доріжки 1 мм), з довірчим інтервалом 95 %

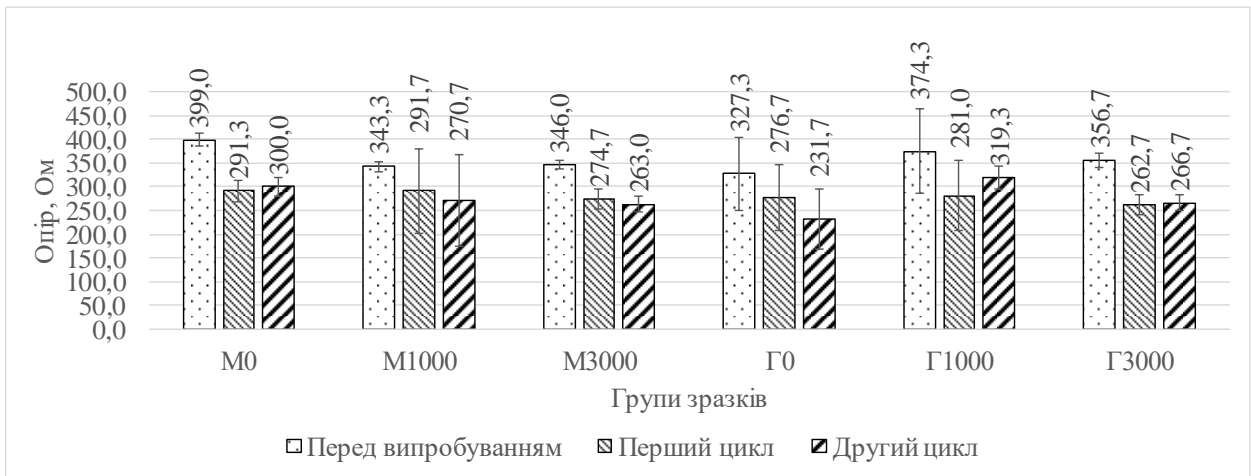


Рис. 3.19. Середнє значення зміни опору після термічних випробувань для всіх груп зразків (для ширини доріжки 2 мм), з довірчим інтервалом 95 %

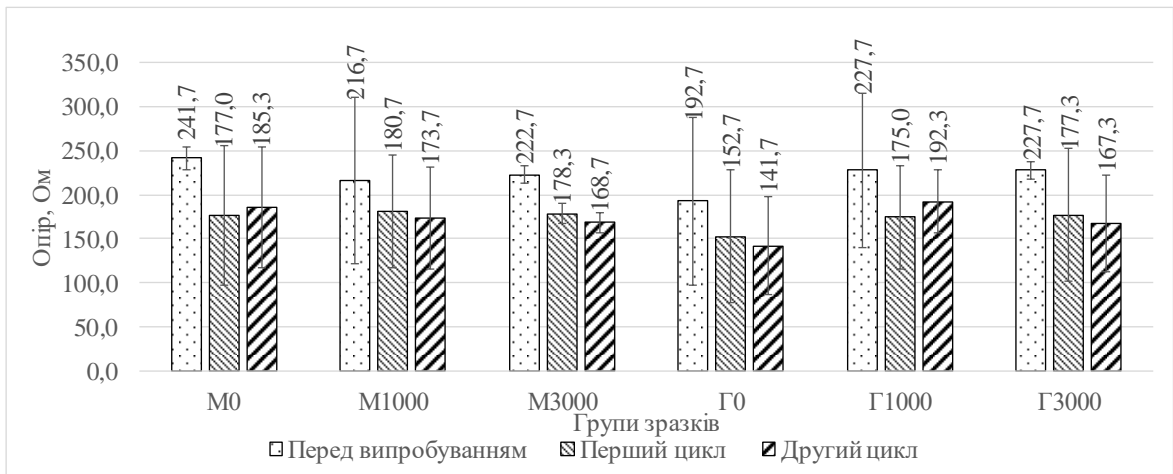


Рис. 3.20. Середнє значення зміни опору після термічних випробувань для всіх груп зразків (для ширини доріжки 3 мм), з довірчим інтервалом 95 %

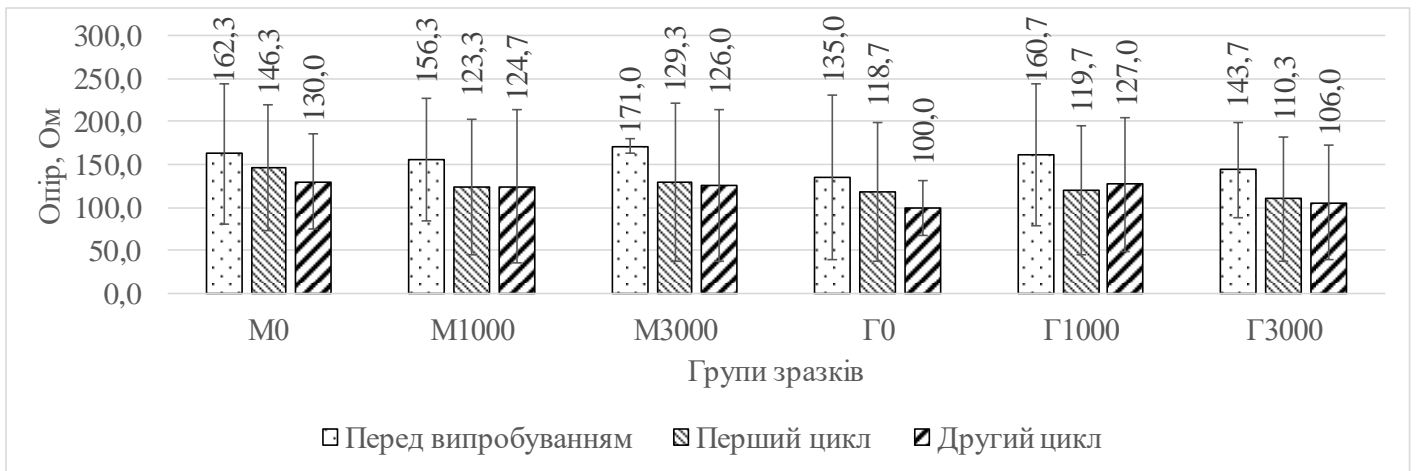


Рис. 3.21. Середнє значення зміни опору після термічних випробувань для всіх груп зразків (для ширини доріжки 4 мм), з довірчим інтервалом 95 %

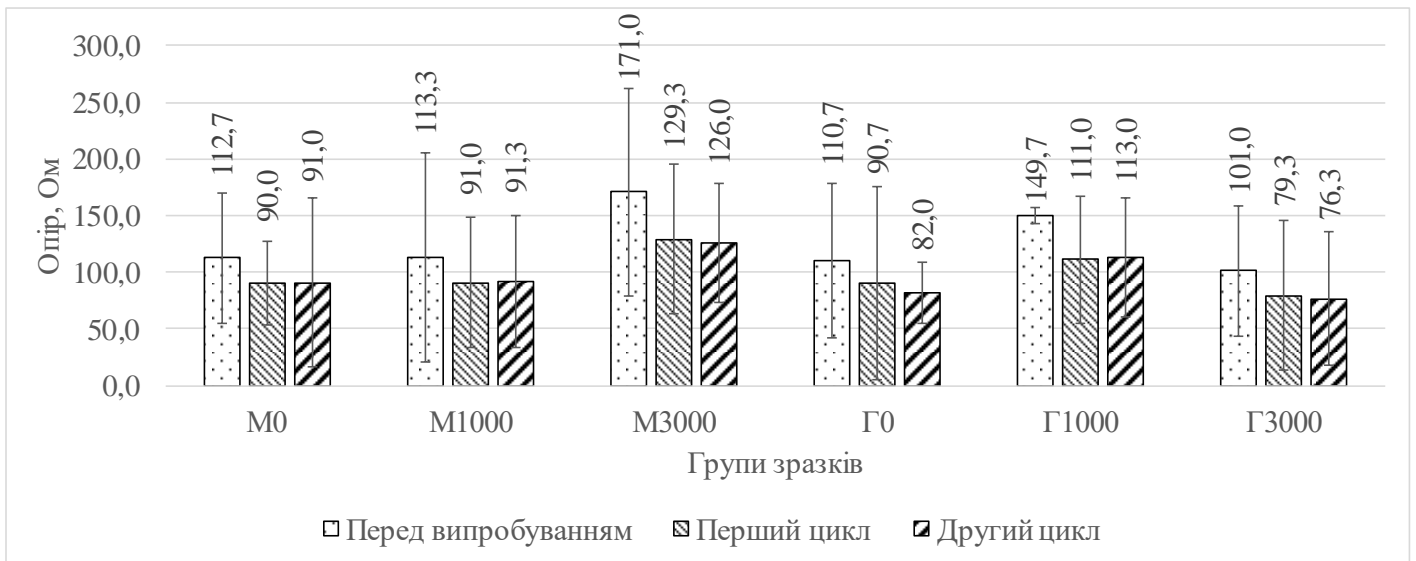


Рис. 3.22. Середнє значення зміни опору після термічних випробувань для всіх груп зразків (для ширини доріжки 5 мм), з довірчим інтервалом 95 %

3.3.2 Механічне зношування

Результати зміни питомого опору для різних груп зразків (Г0, Г1000, Г3000, М0, М1000, М3000) наведено на рисунках 3.23 –3.27. Аналіз зміни опору дозволив оцінити вплив типу основи та режиму обробки коронним розрядом на стійкість провідних доріжок до механічних навантажень.

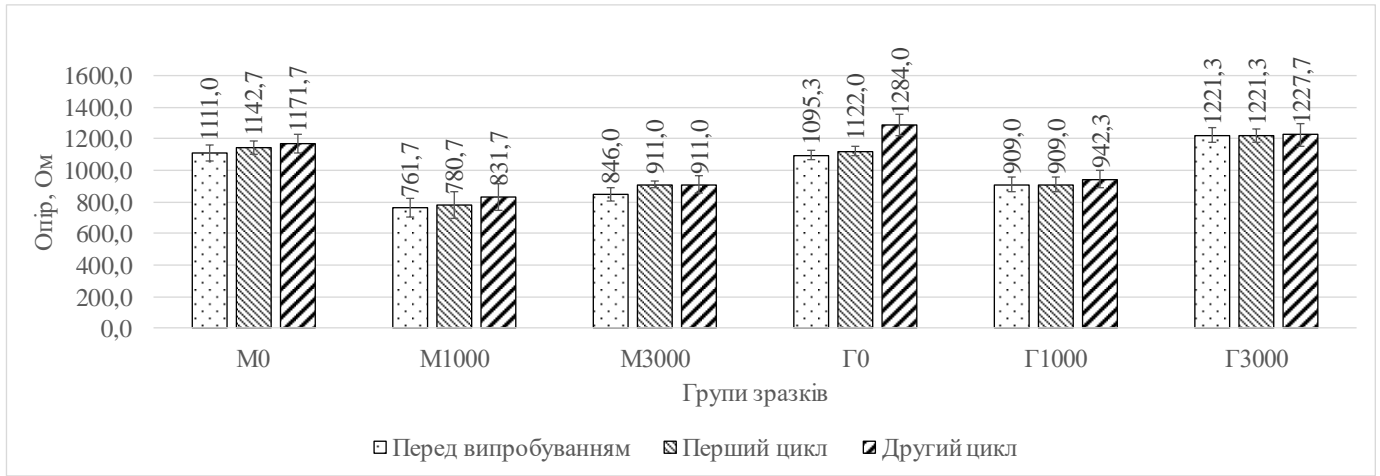


Рис. 3.23. Середнє значення зміни опору після механічного зношування, ширина доріжок 1 мм, довірчий інтервал 95 %

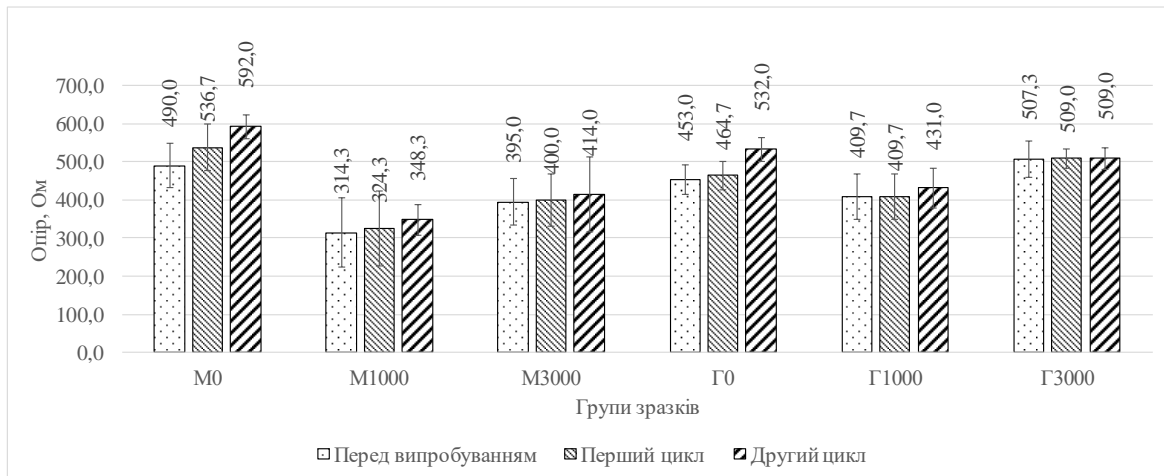


Рис. 3.24. Середнє значення зміни опору після механічного зношування, ширина доріжок 2 мм, довірчий інтервал 95 %

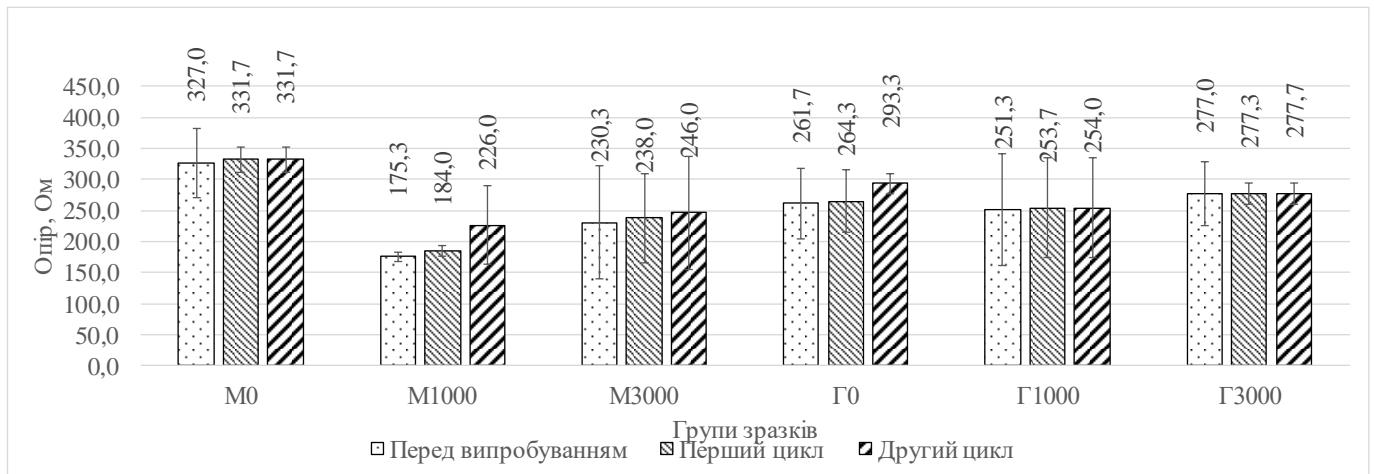


Рис. 3.25. Середнє значення зміни опору після механічного зношування, ширина доріжок 3 мм, довірчий інтервал 95 %

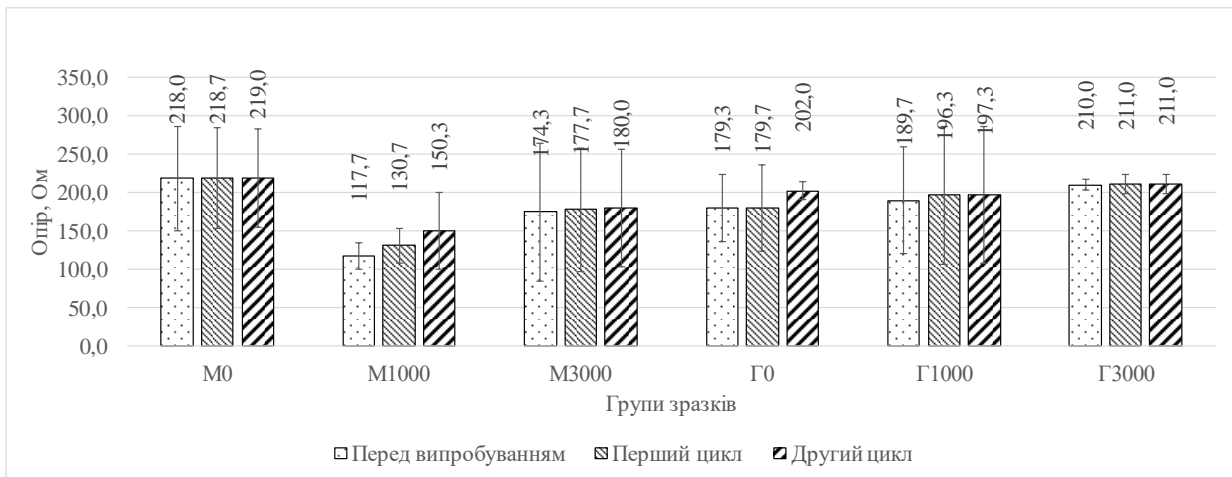


Рис. 3.26. Середнє значення зміни опору після механічного зношування, ширина доріжок 4 мм, довірчий інтервал 95 %

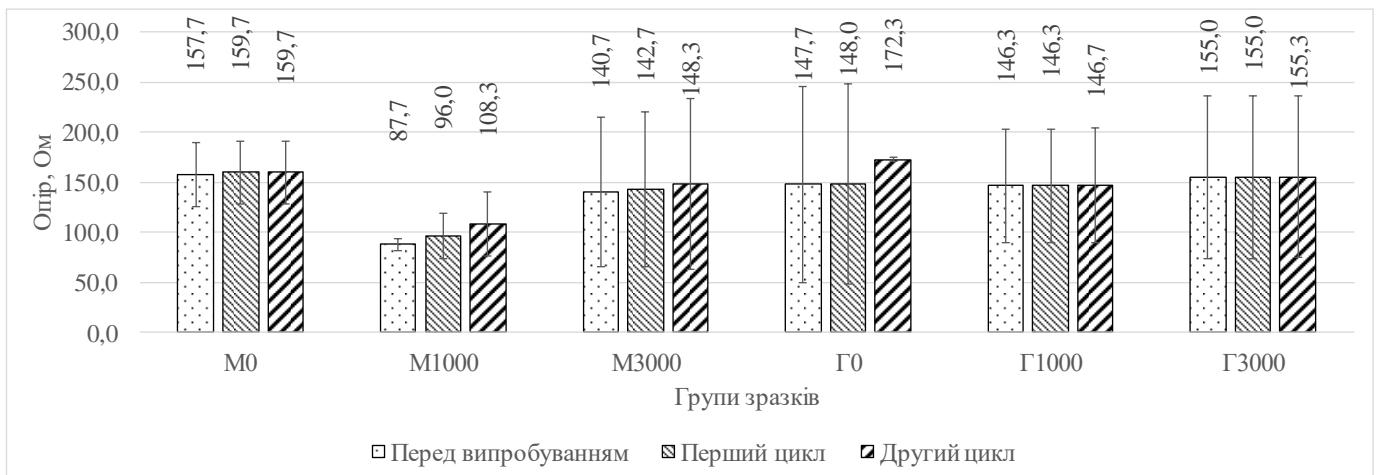


Рис. 3.27. Середнє значення зміни опору після механічного зношування, ширина доріжок 5 мм, довірчий інтервал 95 %

Аналіз отриманих гістограм показує, що зразки на матовому папері, обробленому при потужності 3000 Вт (M3000), продемонстрували найменше зростання опору після механічного навантаження, що свідчить про високу зносостійкість доріжок. Зразки на глянцевого папері без обробки (Г0) виявили найбільше зростання опору, що вказує на недостатню стабільність провідного шару без попередньої підготовки поверхні. Обробка коронним розрядом як для матового, так і для глянцевого паперу дозволила зменшити темпи деградації електричних властивостей, що підтверджує ефективність попередньої

поверхневої модифікації у підвищенні експлуатаційної надійності струмопровідних елементів.

3.3.3 Імітація зношування із використанням забруднювальної речовини

На зразках, що піддавались імітації зношування із використанням забруднювальної речовини, було відстежено динаміку зміни середнього арифметичного значення опору струмопровідних доріжок шириною від 1 до 5 мм після впливу двох послідовних ідентичних циклів зношування із застосуванням забруднювальної речовини (глина, соняшникова олія, спирт, штучний піт). Розрахунок середніх значень здійснювався лише для доріжок, що зберегли провідність; зразки з вимірними значеннями опору, які дорівнювали нулю, що вказує на повну деградацію провідного шару, були виключені з розрахунку.

Зменшення середнього значення опору не завжди є ознакою покращення електропровідних властивостей матеріалу. У деяких випадках після першого або другого циклу зношення провідність зберігали переважно ті струмопровідні доріжки, які мали нижчі початкові значення опору, тоді як доріжки з вищим опором повністю втрачали провідність. Унаслідок цього фіксоване зниження середнього значення опору є результатом вибіркового збереження лише окремих провідних елементів, а не покращення загальної структури провідного шару.

Для кількісного оцінювання ступеня деградації було визначено частку відмов у кожній групі зразків після першого та другого циклів зношення. Повною втратою провідності вважалось перевищення значення опору понад межу вимірювання приладу (2000 Ом). Результати представлено на рис. 3.28. У розрахунках враховано частку доріжок із повною втратою провідності незалежно від їхньої ширини.

Слід зазначити, що на рис. 3.28 наведено частку відмов струмопровідних доріжок після випробувань, визначену як відношення кількості елементів із повною втратою провідності до загальної кількості досліджуваних зразків у відповідній групі. Наведений показник є відносною кількісною характеристикою деградації провідного шару та не

являє собою середнє значення випадкової величини. У зв'язку з цим побудова довірчих інтервалів для наведених даних не здійснювалась. Представлення результатів у вигляді частки відмов дозволяє здійснити порівняльну інженерну оцінку стійкості струмопровідних доріжок до впливу експлуатаційних факторів для різних груп зразків.

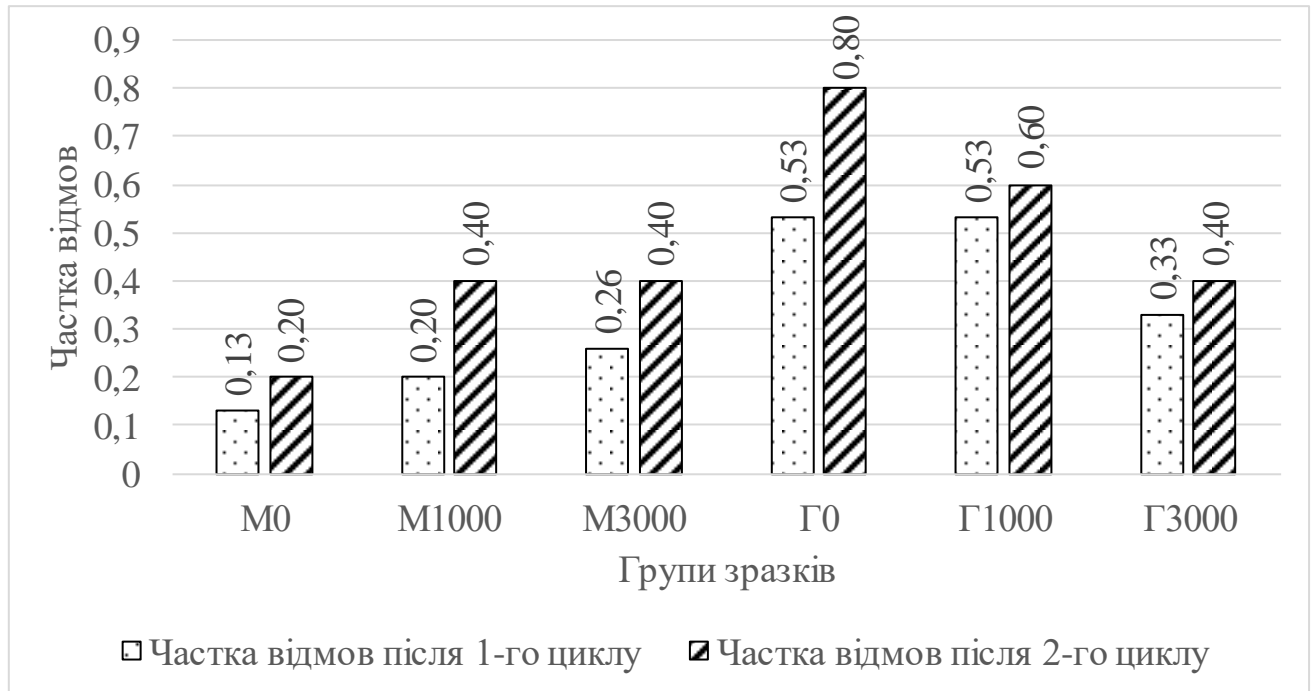


Рис. 3.28. Частки відмов після хімічних випробовувань

Найвищу частку деградації зафіксовано у зразках без попередньої обробки (Г0 і Г1000), де після першого циклу зношення повну втрату провідності продемонстрували 53 % струмопровідних доріжок. Для зразків, оброблених коронним розрядом за потужності 3000 Вт (Г3000), цей показник знизився до 33 %, що свідчить про покращення стабільності провідного шару. Аналогічна тенденція спостерігалася і в зразках на іншій основі: М0 – 13 %, М1000 – 20 %, М3000 – 26 %. Хоча рівень деградації в цих групах був нижчим загалом, зростання потужності обробки не забезпечило чіткого зниження частки відмов, що свідчить про наявність додаткових факторів, які впливають на збереження провідності.

Для серії Г чітко простежується закономірність: зростання потужності попередньої обробки (від 0 до 3000 Вт) призводить до зменшення кількості повних відмов як після першого, так і після другого циклів зношення. Це підтверджує ефективність попередньої модифікації паперової основи при застосуванні трафаретного друку.

Натомість у серії М подібна залежність не спостерігається. Навпаки, зразки М0 демонструють нижчий рівень відмов, ніж М1000 і М3000, що може свідчити про інший механізм взаємодії матеріалу з основою або про підвищену крихкість провідного шару після обробки основи.

Так, зменшення частки відмов завдяки попередній обробці коронним розрядом є релевантним для серії Г, тоді як для серії М така обробка не дає однозначного покращення й потребує додаткового дослідження.

3.4 Схема формування зношуваності виробу

Формування зношуваності виробів зі струмопровідними доріжками на паперовій основі є багатофакторним процесом, що обумовлюється взаємодією фізичних, хімічних, біологічних та електромагнітних впливів. Для комплексного аналізу умов експлуатації було структуровано основні фактори, що визначають характер і динаміку зношення. До цих факторів належать: джерела впливу (біотичні та абіотичні), вид енергії, що спричиняє руйнування (механічна, хімічна, термічна, електромагнітна), тривалість дії, ділянка поширення та характер контакту. Кожен із цих чинників може ініціювати або прискорювати деградацію матеріалів, що особливо критично для паперових основ, чутливих до вологи, температури та механічних деформацій.

У подальших підрозділах увагу зосереджено на визначенні змін електрофізичних параметрів за умов цілеспрямованого навантаження та аналізі механізмів зношування, що домінують у реальних імітаційних умовах. Це дозволяє поглиблено оцінити стійкість матеріалу та обґрунтувати способи підвищення довговічності виробів.

3.4.1 Визначення зміни параметру опору струмопровідних доріжок у дослідницьких умовах

Під час дослідження було здійснено багатофакторне оцінювання зразків, розділених на дві групи за типом основи: Г – глянцева папір, М – матовий папір. Зміни в параметрах після впливу механічних і термічних навантажень було представлено у вигляді дельт.

Динаміка зміни дельти показана на рис. 3.29.

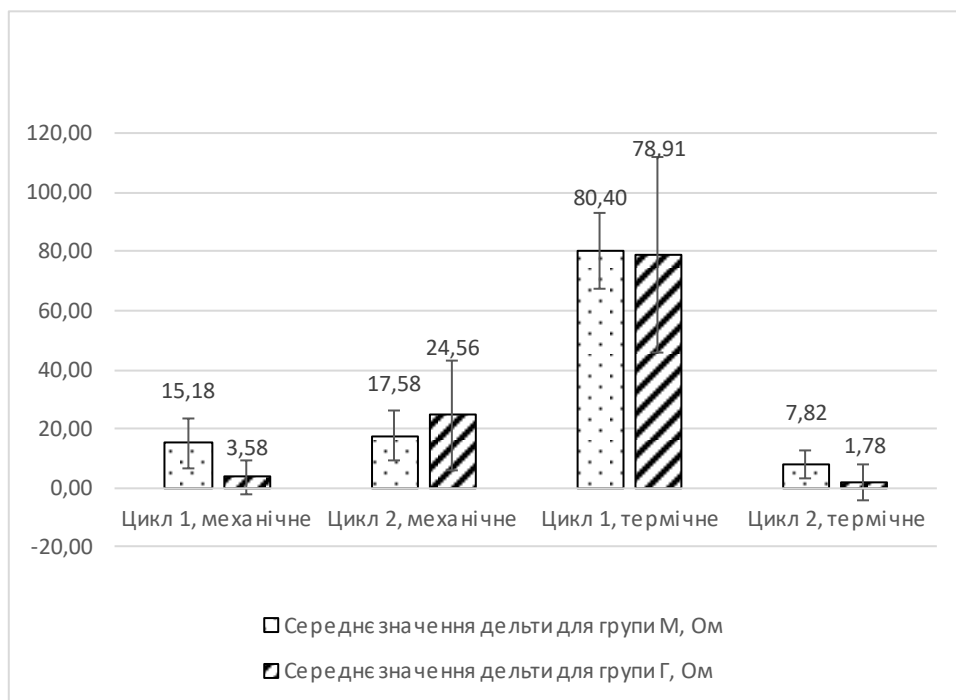


Рис. 3.29. Динаміка зміни дельти середніх значень для глянцевого (Г) та матового (М) паперу за різними циклами випробувань

У механічних випробуваннях (Цикли 1 і 2) дельта обчислювалася як різниця між значенням після впливу і початковим значенням. Так, вища дельта свідчить про більшу деградацію матеріалу. Аналіз показав, що зразки на глянцевому папері (Г) мають суттєво вищі середні значення дельт, особливо в другому циклі, де середнє значення дельти досягає 24,3 проти 2,6 у групі М. Це демонструє нижчу механічну стабільність глянцевого паперу.

У термічних випробуваннях дельта була розрахована як різниця між початковим значенням і значенням після термоциклу. Відповідно, додатні значення вказують на зменшення опору, що є бажаним ефектом, тоді як від'ємні – на його збільшення, що свідчить про погіршення провідності. У першому термічному циклі група Г демонструє кращі результати – середнє зниження опору становить 20 Ом, порівняно з 22,5 Ом у групі М. У другому термічному циклі ситуація змінюється – група М має майже нейтральне значення, тоді як група Г демонструє додатний ефект (8,6 Ом). Це може свідчити про кращу адаптацію глянцевого покриття до повторного термічного впливу.

3.4.2 Встановлення механізмів зношування друкованих струмопровідних шарів

Зношування компонентів зазвичай має комбінований характер. Механічна дія супроводжується як процесами стирання, так і абразивним зношуванням, обумовленим взаємодією з твердими мікрочастинками поверхні або середовища експлуатації. Вплив підвищеної вологості, вібраційних навантажень та циклічних згинальних деформацій спричиняє формування механохімічних і фретингових механізмів деградації, що призводять до зниження електричних характеристик провідних елементів (табл. 3.8).

Таблиця 3.8. Види зношування за ДСТУ 2823-94

№	Подія зношування	Вид зношування	
		Основний	Додатковий
1	Механічна експлуатація	Механічне	Абразивне
2	Вплив навколишньої атмосфери	Окиснювальне	Механохімічне
3	Електрична експлуатація	Електро-ерозійне	-
4	Багаторазове згинання або розгинання	Утомне	Фретингове
5	Вібраційний стрес	Фретингове	Фретингово-ерозійне
6	Вплив вологи	Гідроабразивний	Гідроерозійне

У табл. 3.9 наведено локалізацію та характер пошкоджень, що виникають унаслідок дії зазначених механізмів. Вказані перетворення спричиняють зміну електричних параметрів і можуть обмежувати можливість подальшого використання таких матеріалів у гнучких або багаторазових конструкціях.

Узагальнена схема та систематизовані дані щодо пошкоджень дають змогу описати характер деградаційних процесів у струмопровідних доріжках на паперовій основі. Отримані результати є основою для подальшого обґрунтування вибору матеріалів, режимів формування покриттів та методів підготовки основи, що розглядаються у подальшому розділі дослідження.

Таблиця 3.9. Види пошкодження виробів із провідними доріжками на паперовій основі

Локалізація пошкоджень	Вид пошкоджень	Ознака пошкодження	
Загальні	Зміна зовнішнього вигляду	Зміна кольору провідних доріжок (окиснення, термічний вплив)	
		Матовість або потемніння після нагріву	
		Втрата блиску металізованого шару	
		Часткове відшарування покриття	
	Втрата провідності / деградація шару	Підвищення питомого опору	
		Поява зон з обривом провідності	
		Локальні мікротріщини у провідному шарі	
		Втрата адгезії фарби до основи	
	Руйнування основи	Вздуття паперу через вологу	
		Розшарування волокон	
Деформація основи під дією нагріву або розчинника			
Подряпини			
Локальні	Механічні пошкодження	Розриви	
		Відшарування провідних доріжок	
Локальні	Механічні пошкодження	Пробіи або відриви в місцях з'єднань	
		Механічне стирання доріжок при контакті	
		Локальні оплавлення фарби	
	Термічні пошкодження	Зміна кольору або потемніння після перегріву	
		Розтріскування шару через температурні цикли	
		Корозія металевих частинок фарби (при контакті з вологою, кислотами, органічними розчинниками)	
	Хімічні пошкодження	Утворення плям	
		Втрата провідності на межі контакту шарів	
		Зміна ширини провідної доріжки	
	Порушення геометрії	Нерівність країв	
		Дефекти контурів (зміщення під час друку)	
		Витягування або стискання при зміні вологості	
		Втрата провідності в місцях пайки, пресування чи контакту з електродами	
	Деградація з'єднань / контактів	Механічні відриви провідного шару в зоні переходу	

3.5 Висновки до третього розділу

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що попередня обробка паперової основи коронним розрядом істотно впливає на електрофізичні властивості струмопровідних доріжок, нанесених як методом магнетронного напилення, так і методом трафаретного друку. Модифікація поверхні сприяє формуванню більш стабільної провідної структури.

2. Найменші значення питомого електричного опору зафіксовано для зразків на матовому папері після обробки коронним розрядом потужністю 3000 Вт із використанням підшару хрому. Це свідчить про ефективне поєднання параметрів попередньої обробки та міжшарної взаємодії в системі «паперова основа – підшар – провідний матеріал».

3. Показано, що використання трафаретного друку забезпечує більш стабільні результати електропровідності та зносостійкості струмопровідних доріжок порівняно з методом магнетронного напилення, що свідчить про кращу технологічну сумісність цього методу з паперовими основами.

4. Статистичний аналіз експериментальних даних підтвердив відсутність значущих технологічних похибок у більшості досліджених груп, що засвідчує надійність застосованих методів нанесення та коректність отриманих результатів.

5. Продемонстровано, що ефективність формування провідних доріжок методом трафаретного друку на паперових основах визначається не лише властивостями фарбової композиції, а насамперед морфологічним станом поверхні, який формується внаслідок попередньої обробки коронним розрядом.

6. Аналіз топографічних параметрів поверхні та результати оптичної мікроскопії підтвердили, що інтенсивність попередньої обробки впливає на ступінь нерівностей і гомогенність нанесеного шару, особливо у випадку магнетронного напилення.

7. Результати випробувань на зношування вказують на підвищену механічну стабільність струмопровідних доріжок, сформованих на матовому папері з попередньою

обробкою коронним розрядом. Зокрема, на зразках групи М3000 виявлено найменше зростання опору після механічних навантажень та зберегли провідність після дії забруднювальних речовин.

8. Для глянцевого паперових основ залежність між рівнем попередньої обробки та деградацією провідних властивостей мала більш лінійний характер, що свідчить про іншу природу взаємодії поверхневої модифікації з мікроструктурою цього типу паперу.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ПІДГОТОВКИ ПАПЕРОВОЇ ОСНОВИ ДО НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ДОРІЖОК ТРАФАРЕТНИМ ДРУКОМ

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що обробка паперової основи коронним розрядом покращує морфологічні властивості поверхні, сприяючи більш стабільному формуванню електропровідних доріжок. Окрім того, додаткова термічна обробка після друку забезпечує подальше зниження електричного опору та підвищення зносостійкості сформованого шару. Комбінування цих двох етапів (попереднє коронування та завершальна термообробка) може бути інтегровано в основний технологічний маршрут як умова для досягнення підвищених електрофізичних показників готових виробів. У подальших підрозділах розглянуто особливості реалізації цих обробок, їхні параметри, режими та вплив на мікроструктурні та електричні характеристики друкованих елементів.

4.1 Математичний опис поверхні паперу методом фрактального аналізу

Було застосовано розрахунок фрактальної розмірності як засіб опису поверхні основи, який вже застосовувався нами при оцінюванні різних масштабів поверхневого профілю паперу [20], а також був застосований і в інших дослідженнях [168].

Фрактальну розмірність поверхні паперу визначали за допомогою програмного забезпечення NetLogo. Для цих вимірювань використано алгоритм фрактального аналізу, а саме метод підрахунку розмірів або метод сітки.

Було встановлено початкову довжину квадрату на 8,5 і приріст на 0,5. Фрактальний аналіз зображень охоплював розрахунок кількості квадратів на кривих протягом 15 ітерацій.

На рис. 4.1 показано приклади діаграм, які було проаналізовано.

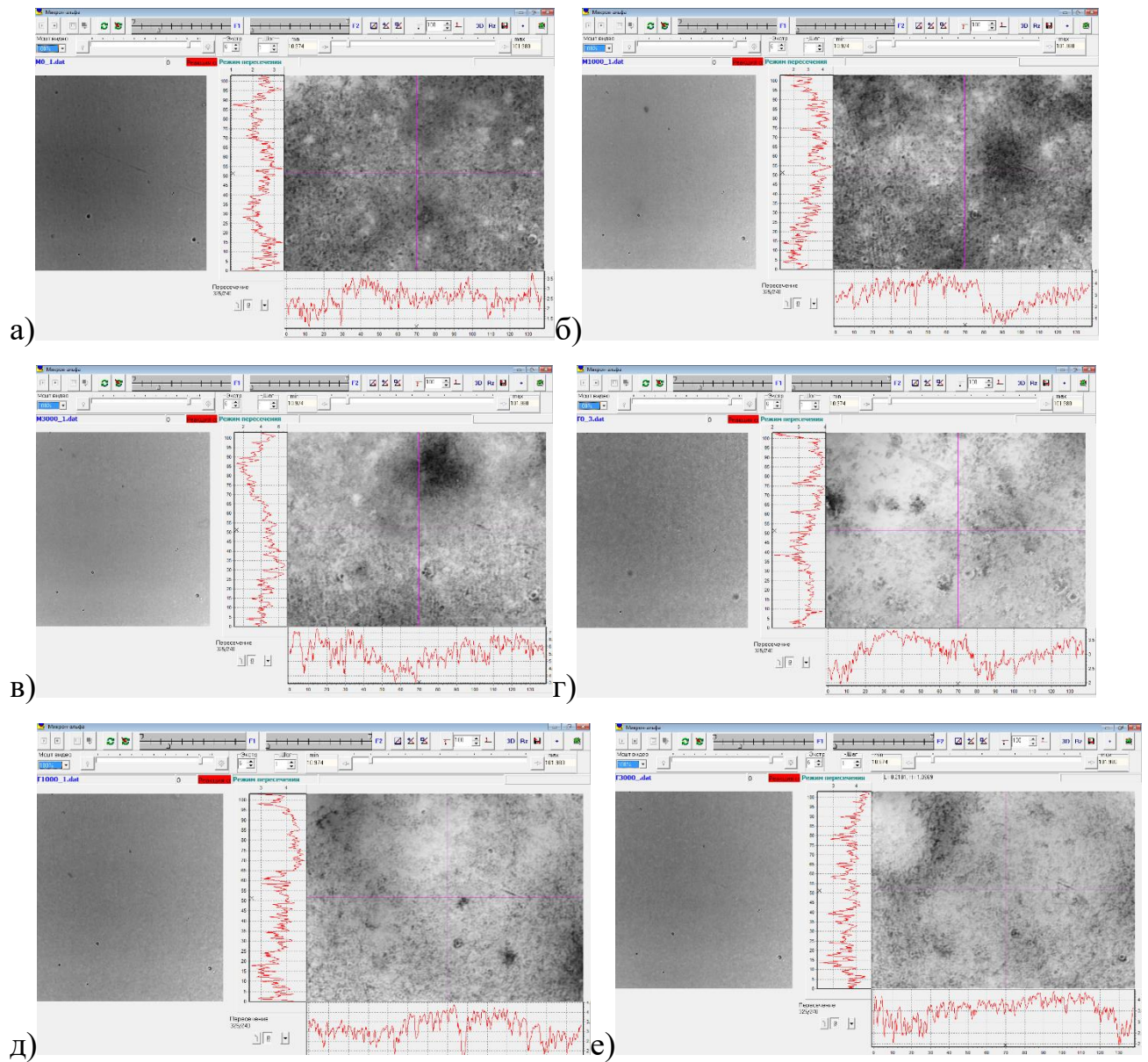


Рис. 4.1. Приклад аналізованих профілів поверхні паперу: а – група M0, б – M1000, в – M3000, г – Г0, д – Г1000, е – Г3000

На рис. 4.2 показано приклад знаходження кількості комірок для певного розміру та кроку комірок.

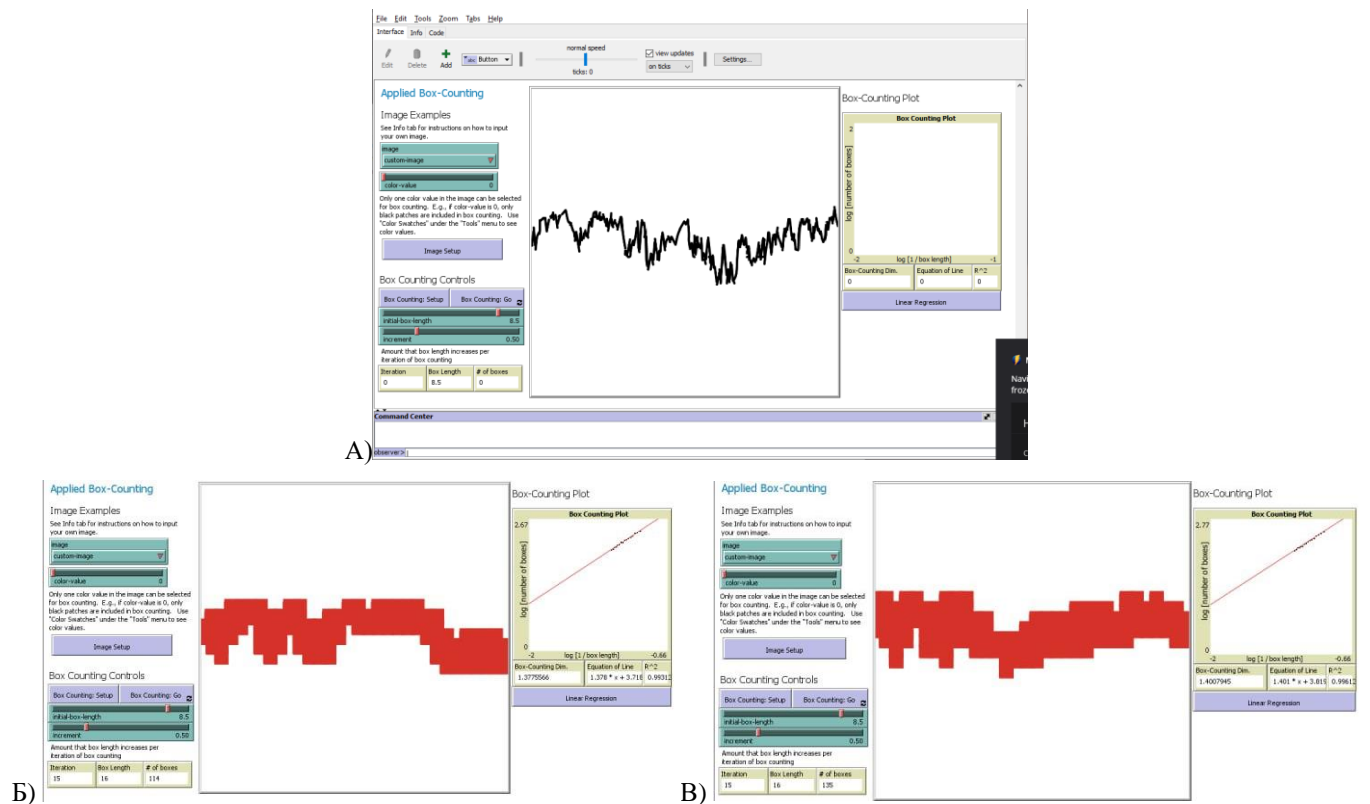


Рис. 4.2. Приклад визначення кількості заповнених комірок та побудови прямої для знаходження фрактальної розмірності: а – приклад підвантаження діаграми профілю поверхні в програмне забезпечення NetLogo; б – лицьова сторона основи групи М0 з параметрами фрактальної розмірності Мінковського 1.37; в - лицьова сторона основи групи М3000 з параметрами фрактальної розмірності Мінковського 1.40

У результаті розрахунків було отримано наступні результати (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Середня фрактальна розмірність профілю поверхні основ

Групи зразків	Фрактальна розмірність поверхні паперу D
M0	1,393
M1000	1,399
M3000	1,414
G0	1,339
G1000	1,367
G3000	1,391

Так, спостерігається залежність фрактальної розмірності поверхні основи від режиму обробки, а саме збільшення розмірності в обох групах (рис. 4.3).

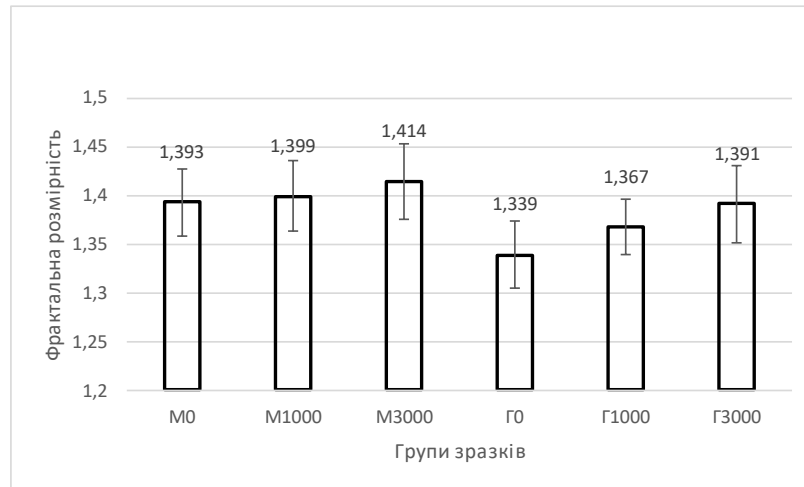


Рис. 4.3. Результати розрахунків фрактальної розмірності основ, групи: M0 – матовий папір без обробки, M1000 – матовий папір, обробка 1000Вт, M3000 – матовий папір, обробка 3000Вт, Г0 – глянцева папір без обробки, Г1000 – глянцева папір, обробка 1000Вт, Г3000 – глянцева папір, обробка 3000Вт

Відповідно до діаграми на рис. 4.3, значення фрактальної розмірності варіюються в межах $D = 1,33-1,42$, що характеризує різний ступінь складності поверхневої структури досліджуваних зразків.

Для математичного опису та візуалізації поверхонь із заданими фрактальними властивостями доцільно використовувати метод фрактального броунівського руху (Fractional Brownian Motion, fBm), який широко застосовується для моделювання природних шорстких поверхонь [169]. Цей метод базується на використанні параметра Херста H , який безпосередньо пов'язаний з фрактальною розмірністю співвідношенням:

$$H = 2 - D \quad (4.1)$$

де D – фрактальна розмірність профілю поверхні (для одновимірного профілю).

Фрактальний броунівський рух характеризується самоподібністю структури на різних масштабах та довготривалою кореляцією між точками профілю [170]. Для

тривимірної поверхні фрактальна розмірність становить $D_{\text{поверхні}} = 1 + D_{\text{профілю}}$, що відповідає загальній теорії фрактальної геометрії [171].

Процес побудови тривимірної моделі поверхні паперової основи здійснювався у декілька етапів. На першому етапі для кожного типу основи визначався параметр Херста на основі експериментально отриманої фрактальної розмірності. Наприклад, для зразка М0 з $D = 1,393$ параметр Херста становив $H = 0,607$, що характеризує помірно шорстку поверхню з певною довготривалою кореляцією нерівностей.

Другий етап передбачав нормалізацію амплітудних характеристик згенерованої поверхні відповідно до експериментально вимірених параметрів шорсткості R_a та R_{max} . Для цього використовувалось співвідношення між стандартним відхиленням висот профілю σ та середнім арифметичним відхиленням профілю R_a [172]:

$$\sigma \approx 2,5 \times R_a \quad (4.2)$$

Для кожного з шести типів досліджуваних паперових основ було згенеровано тривимірні моделі поверхонь розміром 100×100 точок, що відповідає фізичній ділянці $5 \times 5 \text{ мм}^2$ (рис. 4.4–4.5).

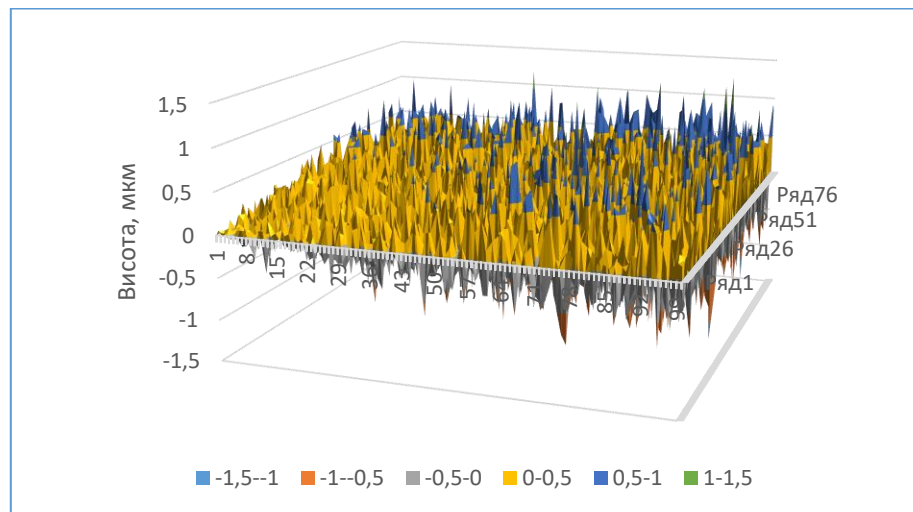


Рис. 4.4. Тривимірна модель поверхні досліджуваних паперових основ групи М0

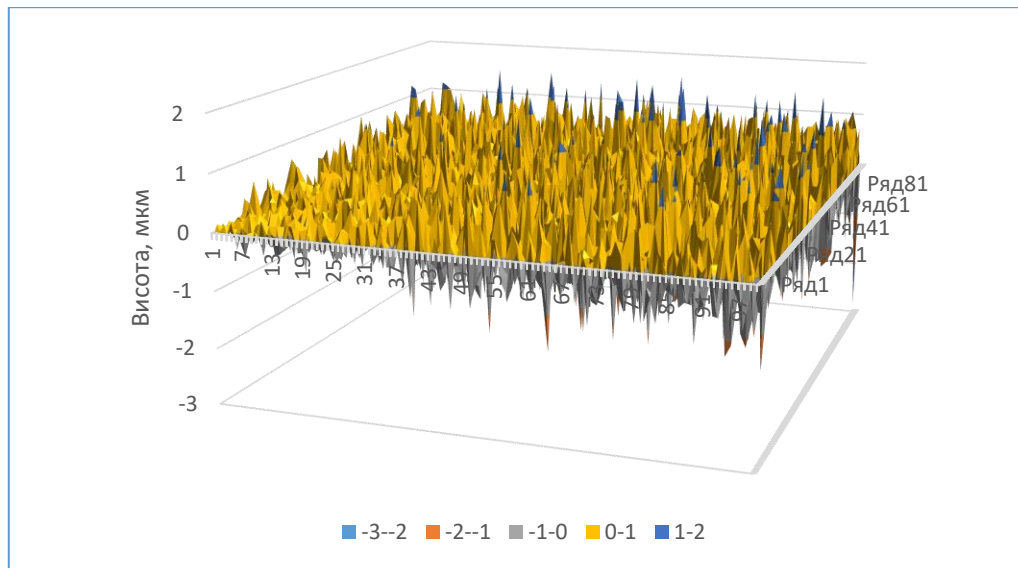


Рис. 4.5. Тривимірна модель поверхні досліджуваних паперових основ групи М3000

Розроблена методологія тривимірного моделювання поверхонь паперових основ має важливе практичне значення для низки застосувань: прогнозування друкарських властивостей, оптимізації технології виробництва паперу, контролю якості та стандартизації.

Варто зазначити, що розроблена модель базується на припущенні ізотропності поверхні, тобто однакової структури у всіх напрямках. Врахування анізотропії потребує використання більш складних моделей, як-от мультифрактальний аналіз або анізотропний фрактальний броунівський рух. Окрім того, модель не враховує можливі періодичні компоненти рельєфу, які можуть виникати внаслідок особливостей технологічного процесу.

4.2 Визначення засобів забезпечення якості основи та кінцевого виробу

У процесі аналітичного дослідження, представленого в розділі 1, було визначено основні групи факторів, що впливають на якість друкованої електроніки на паперовій основі. У подальшому, з урахуванням проведеного комплексу досліджень та порівняння з попередніми роботами [32, 34, 173, 174], було виділено кластеризовані групи факторів,

що мають найбільший вплив на якість як основи, так і кінцевого виробу. Ці фактори, разом із можливими засобами їхнього корегування, подано нижче:

- властивості основи (ВО, x_1) [77, 93, 175];
- формула чорнила (ФЧ, x_2) [3, 22, 34, 176, 177];
- процес друку (ПД, x_3) [3, 178, 179];
- попередня обробка основи (ПОО, x_4) [180];
- післядрукарська обробка друкованих доріжок (ПОДД, x_5) [2, 7, 67, 80].

Так, процес прийняття рішень щодо вибору варіанту обробки паперової основи може розглядатися як задача багатокритеріального оптимального вибору. У дослідженні вибір варіанту обробки паперової основи здійснено за допомогою застосування ієрархічного аналізу факторів впливу, побудованого на основі результатів експериментів і оцінюванні придатності основ [181].

Сформовану ієрархію, закладену в основу оцінювання альтернативних варіантів технологічного процесу, наведено на рис. 4.6.

У результаті декомпозиції проблеми визначено, що альтернативами є варіанти технологічного процесу $A_1 \dots A_N$, які підлягають оптимізації з урахуванням взаємодії факторів впливу в межах визначених кластерів: властивостей основи, складу струмопровідної фарби, параметрів друку, режимів попередньої та післядрукарської обробки.

Кінцевим критерієм оцінювання є отримання провідних шарів з мінімальним питомим опором, високою адгезією та стійкістю до механічних, термічних і хімічних навантажень, що визначає їхню придатність для використання у функціональних елементах друкованої електроніки.

До оцінювання було залучено експертів з галузі електроніки та друкування. Сформовано результуючу матрицю парних порівнянь з урахуванням вагомості оцінювання експертів (табл. 4.2).

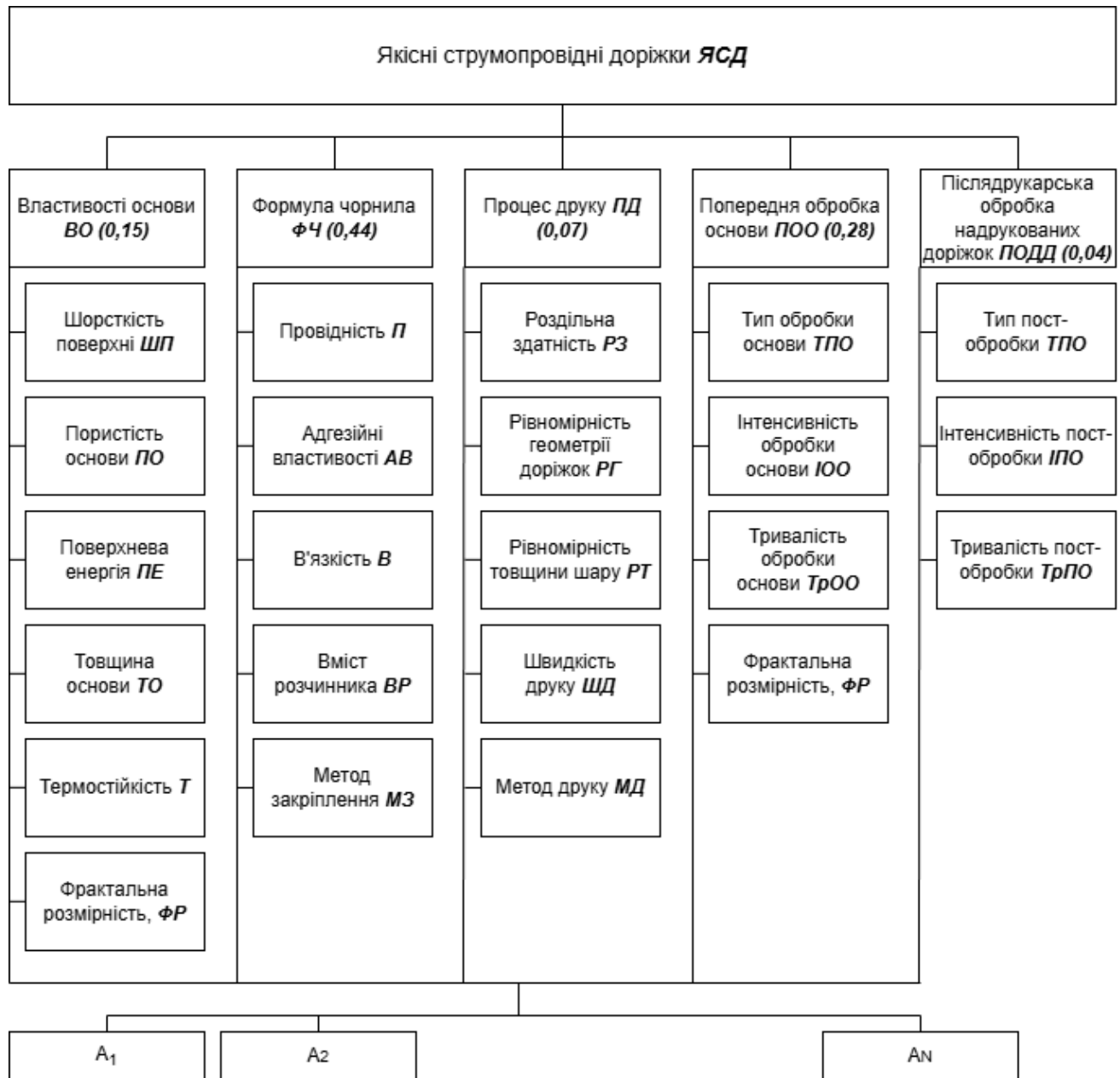


Рис. 4.6. Ієрархія факторів забезпечення якісних струмопровідних доріжок, створених друкарськими методами

Оскільки кожен критерій має свої критерії 2-го рівня, експертами було проведено оцінювання за кожним критерієм. У табл. 4.3–4.7 наведено результуючі матриці парних порівнянь з урахуванням вагомості думки експерта.

Таблиця 4.2. Результуюча матриця парних порівнянь

X_i	ВО, X_1	ФЧ, X_2	ПД, X_3	ПОО, X_4	ПОДД, X_5
ВО, X_1	1,000	0,330	2,000	0,500	4,000
ФЧ, X_2	3,000	1,000	5,000	2,000	9,000
ПД, X_3	0,500	0,200	1,000	0,250	2,000
ПОО, X_4	2,000	0,500	4,000	1,000	7,000
ПОДД, X_5	0,250	0,110	0,500	0,140	1,000

Таблиця 4.3. Результуюча матриця парних порівнянь критеріїв кластеру «Властивості основи»

X_i	Шорсткість поверхні, X_1	Пористість основи, X_2	Поверхнева енергія, X_3	Товщина основи, X_4	Термостійкість, X_5	Фрактальна розмірність, X_6
Шорсткість поверхні, X_1	1,000	0,500	2,000	2,000	4,000	5,000
Пористість основи, X_2	2,000	1,000	2,000	3,000	5,000	8,000
Поверхнева енергія, X_3	0,500	0,500	1,000	2,000	2,000	3,000
Товщина основи, X_4	0,500	0,333	0,500	1,000	2,000	2,000
Термостійкість, X_5	0,250	0,200	0,500	0,500	1,000	2,000
Фрактальна розмірність, X_6	0,200	0,125	0,333	0,500	0,500	1,000

Таблиця 4.4. Результуюча матриця парних порівнянь критеріїв кластеру «Формула чорнила»

X_i	Провідність, X_1	Адгезійні властивості, X_2	В'язкість, X_3	Вміст розчинника, X_4	Метод затвердіння / полімеризації, X_5
Провідність, X_1	1,000	2,000	2,000	9,000	3,000
Адгезійні властивості, X_2	0,500	1,000	1,000	5,000	2,000
В'язкість, X_3	0,500	1,000	1,000	5,000	2,000
Вміст розчинника, X_4	0,111	0,200	0,200	1,000	0,333
Метод закріплення, X_5	0,333	0,500	0,500	3,000	1,000

Далі було визначено вектор пріоритетів для кожної матриці за 4-м способом, що є найбільш точним: нормування власного вектора матриці, який визначається середнім геометричним значення за кожним рядком матриці попарних порівнянь. Після нормалізації власного вектора матриці визначено максимально наближене власне число матриці λ_{max} , індекс узгодженості та відношення узгодженості, враховуючи випадковий

індекс залежно від розмірності матриці. У табл. 4.8–4.13 наведено розраховані значення для кожної матриці.

Таблиця 4.5. Результуюча матриця парних порівнянь критеріїв кластеру «Процес друку»

X_i	Роздільна здатність, X_1	Рівномірність ширини лінії, X_2	Рівномірність товщини шару, X_3	Швидкість друку, X_4	Метод друку, X_5
Роздільна здатність, X_1	1,000	0,500	0,250	3,000	3,000
Рівномірність геометрії доріжки, X_2	2,000	1,000	0,500	5,000	5,000
Рівномірність товщини шару, X_3	4,000	2,000	1,000	9,000	9,000
Швидкість друку, X_4	0,333	0,200	0,111	1,000	1,000
Метод друку, X_5	0,333	0,200	0,111	1,000	1,000

Таблиця 4.6. Результуюча матриця парних порівнянь критеріїв кластеру «Попередня обробка основи»

X_i	Тип обробки основи, X_1	Інтенсивність обробки основи, X_2	Тривалість обробки основи, X_3	Фрактальна розмірність, X_4
Тип обробки основи, X_1	1,000	4,400	6,400	3,600
Інтенсивність обробки основи, X_2	0,227	1,000	6,000	4,400
Тривалість обробки основи, X_3	0,156	0,166	1,000	0,167
Фрактальна розмірність, X_4	0,277	0,227	5,988	1,000

Таблиця 4.7. Результуюча матриця парних порівнянь критеріїв кластеру «Післядрукарська обробки друкованих доріжок»

X_i	Тип пост-обробки основи, X_1	Інтенсивність пост-обробки основи, X_2	Тривалість пост-обробки основи, X_3
Тип пост-обробки основи, X_1	1,000	3,200	5,200
Інтенсивність пост-обробки основи, X_2	0,312	1,000	5,000
Тривалість пост-обробки основи, X_3	0,192	0,200	1,000

Таблиця 4.8. Порівняння кластерів критеріїв якості відносно глобальної мети – отримання якісного виробу друкованих доріжок на паперовій основі

X_i	ВО, X_1	ФЧ, X_2	ПД, X_3	ПОО, X_4	ПОДД, X_5	Вектор локального пріоритету (0,15; 0,44; 0,07; 0,28; 0,04) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 5,01$ IU=0,01 VI=1,12 VU=0,01
ВО, X_1	1,000	0,330	2,000	0,500	4,000	
ФЧ, X_2	3,000	1,000	5,000	2,000	9,000	
ПД, X_3	0,500	0,200	1,000	0,250	2,000	
ПОО, X_4	2,000	0,500	4,000	1,000	7,000	
ПОДД, X_5	0,250	0,110	0,500	0,140	1,000	

Таблиця 4.9. Порівняння критеріїв другого рівня в межах кластера «Властивості основи»

X_i	Шорсткість поверхні, X_1	Пористість основи, X_2	Поверхнева енергія, X_3	Товщина основи, X_4	Термостійкість, X_5	Фрактальна розмірність, X_6	Вектор локального пріоритету (0,24; 0,37; 0,16; 0,11; 0,07; 0,05) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 6,08$ IU=0,08 VI=1,24 VU=0,07
Шорсткість поверхні, X_1	1,000	0,500	2,000	2,000	4,000	5,000	
Пористість основи, X_2	2,000	1,000	2,000	3,000	5,000	8,000	
Поверхнева енергія, X_3	0,500	0,500	1,000	2,000	2,000	3,000	
Товщина основи, X_4	0,500	0,333	0,500	1,000	2,000	2,000	
Термостійкість, X_5	0,250	0,200	0,500	0,500	1,000	2,000	
Фрактальна розмірність, X_6	0,200	0,125	0,333	0,500	0,500	1,000	

Таблиця 4.10. Порівняння критеріїв другого рівня в межах кластера «Формула чорнила»

X_i	Провідність, X_1	Адгезійні властивості, X_2	В'язкість, X_3	Вміст розчинника, X_4	Метод закріплення, X_5	Вектор локального пріоритету (0,40; 0,21; 0,21; 0,04; 0,11) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 5,00$ IU=0,01 VI=1,12 VU=0,01
Провідність, X_1	1,000	2,000	2,000	9,000	3,000	
Адгезійні властивості, X_2	0,500	1,000	1,000	5,000	2,000	
В'язкість, X_3	0,500	1,000	1,000	5,000	2,000	
Вміст розчинника, X_4	0,111	0,200	0,200	1,000	0,333	
Метод закріплення, X_5	0,333	0,500	0,500	3,000	1,000	

Таблиця 4.11. Порівняння критеріїв другого рівня в межах кластера «Процес друку»

X_i	Роздільна здатність, X_1	Рівномірність геометрії доріжки, X_2	Рівномірність товщини шару, X_3	Швидкість друку, X_4	Метод друку, X_5	Вектор локального пріоритету (0,13; 0,25; 0,49; 0,05) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 5,00$ $IY=0,01$ $VI=1,12$ $VU=30,01$
Роздільна здатність, X_1	1,000	0,500	0,250	3,000	3,000	
Рівномірність геометрії доріжки, X_2	2,000	1,000	0,500	5,000	5,000	
Рівномірність товщини шару, X_3	4,000	2,000	1,000	9,000	9,000	
Швидкість друку, X_4	0,333	0,200	0,111	1,000	1,000	
Метод друку, X_5	0,333	0,200	0,111	1,000	1,000	

Таблиця 4.12. Порівняння критеріїв другого рівня в межах кластера «Попередня обробка основи»

X_i	Тип обробки основи, X_1	Інтенсивність обробки основи, X_2	Тривалість обробки основи, X_3	Фрактальна розмірність, X_4	Вектор локального пріоритету (0,41; 0,17; 0,10; 0,30) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 4,11$ $IY=0,11$ $VI=0,9$ $VU=0,13$
Тип обробки основи, X_1	1,000	3,000	6,000	1,500	
Інтенсивність обробки основи, X_2	0,333	1,000	2,000	0,500	
Тривалість обробки основи, X_3	0,167	0,500	1,000	0,250	
Фрактальна розмірність, X_4	0,667	2,000	4,000	1,000	

Таблиця 4.13. Порівняння критеріїв другого рівня в межах кластера «Післядрукарська обробка друкованих доріжок»

X_i	Тип пост-обробки основи, X_1	Інтенсивність пост-обробки основи, X_2	Тривалість пост-обробки основи, X_3	Вектор локального пріоритету (0,66; 0,20; 0,12) Власне значення матриці $\lambda_{max} = 3,14$ $IY=0,01$ $VI=0,58$ $VU=0,01$
Тип пост-обробки основи, X_1	1,000	3,200	5,200	
Інтенсивність пост-обробки основи, X_2	0,312	1,000	5,000	
Тривалість пост-обробки основи, X_3	0,192	0,200	1,000	

Найбільш вагомими критеріями для досягнення поставленої мети забезпечення якісного відбитка струмопровідних доріжок на паперовій основі є кластери «Формула чорнила» (вагомість 0,44) та «Попередня обробка основи» (вагомість 0,28).

Найбільш вагомим підфактором є тип пост-обробки основи (вагомість 0,66).

Найбільш вагомим підфактором у кластері «Властивості основи» є пористість основи (вагомість 0,37).

Найбільш вагомим підфактором у кластері «Формула чорнила» є провідність (вагомість 0,40).

Найбільш вагомим підфактором у кластері «Процес друку» є рівномірність товщини шару (вагомість 0,49)

Найбільш вагомим підфактором у кластері «Попередня обробка основи» є тип обробки (вагомість 0,41).

Найбільш вагомим підфактором у кластері «Післядрукарська обробка друкованих доріжок» є тип обробки (вагомість 0,66).

Альтернативами в цьому випадку є матеріали – основа і фарба.

4.3 Дослідження якості нанесення схем струмопровідних доріжок

Враховуючи, що струмопровідні доріжки функціонують у реальних умовах експлуатації, вони зазнають впливу низки чинників, серед яких визначальними є механічні, хімічні та температурні навантаження. Ці чинники можуть суттєво змінювати електричні характеристики струмопровідних доріжок, що впливає на працездатність усього електронного виробу.

У підрозділах 4.3.1–4.3.3 розглянуто результати порівняння для структур, сформованих на основах із різними режимами обробки. Це дозволяє зробити висновки щодо доцільності використання певних режимів попередньої обробки з метою підвищення надійності друкованих елементів у конкретних умовах експлуатації.

4.3.1 Аналіз топографічного профілю поверхні паперової основи після коронної обробки методом профілометрії

За результатами статистичного оброблення встановлено наявність оберненої кореляції між значенням R_a та початковим питомим опором доріжок. Це свідчить про те, що зростання середньої шорсткості сприяє збільшенню параметрів адгезії фарби та

формуванню щільнішого провідного шару, що знижує електричний опір. Найвища кореляція спостерігалась у зразках групи M3000.

Окрім того, встановлено кореляцію між параметром R_{\max} та зміною опору після термічних і механічних випробувань. Зразки з більшим значенням R_{\max} демонстрували меншу стабільність після навантажень, що свідчить про чутливість до локальних дефектів поверхні. Так, параметр R_z навпаки виявив обмежену кореляцію з електричними властивостями, що вказує на меншу чутливість середніх нерівностей профілю до формування провідних зв'язків.

4.3.2 Дослідження залежності параметрів коронування поверхні паперової основи та електрофізичних властивостей виробу

Із метою візуалізації результатів було побудовано графічну залежність електричного опору струмопровідних доріжок від режиму попередньої обробки паперової основи коронним розрядом. Для обох типів паперу (глянцевого та матового) було дійснено порівняння значення опору доріжок шириною 5 мм, 4 мм, 3 мм, 2 мм та 1 мм. На рис. 4.7 – 4.8 представлено результати вимірювання опору для трьох режимів обробки: без обробки (0 Вт), обробка при потужності 1000 Вт та при 3000 Вт для трефаретного друку, та рис. 4.9 для магнетронного напилення.

Аналіз отриманих даних демонструє чітку залежність електрофізичних властивостей друкованої доріжки від режиму попередньої обробки паперової основи. У всіх випадках спостерігається зменшення опору при застосуванні коронування порівняно з необробленими зразками, що свідчить про покращення умов адгезії та рівномірності нанесення струмопровідного шару. Найнижчі значення опору досягнуто при потужності обробки 3000 Вт, що дозволяє зробити висновок про ефективність інтенсивного режиму коронування для покращення електропровідності виробу. Водночас, для вузьких доріжок (1–2 мм) виявлено найбільший градієнт зміни, що вказує на вищу чутливість до якості підготовки поверхні.

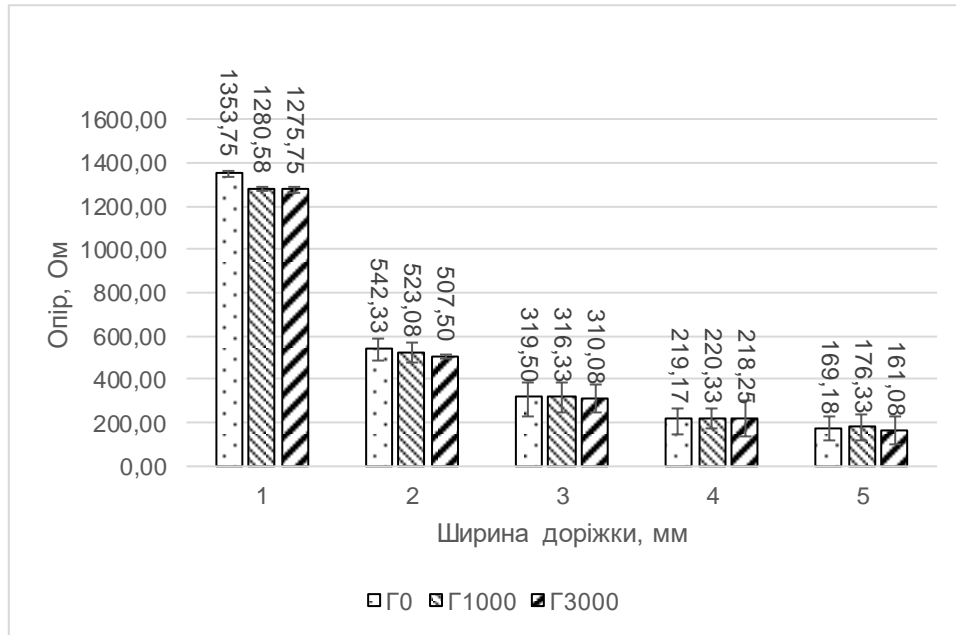


Рис. 4.7. Залежність електричного опору струмопровідних доріжок від режиму обробки поверхні паперової основи (глянцевий папір), групи: Г0 – глянцевий папір без обробки, Г1000 – глянцевий папір, обробка 1000Вт, Г3000 – глянцевий папір, обробка 3000Вт

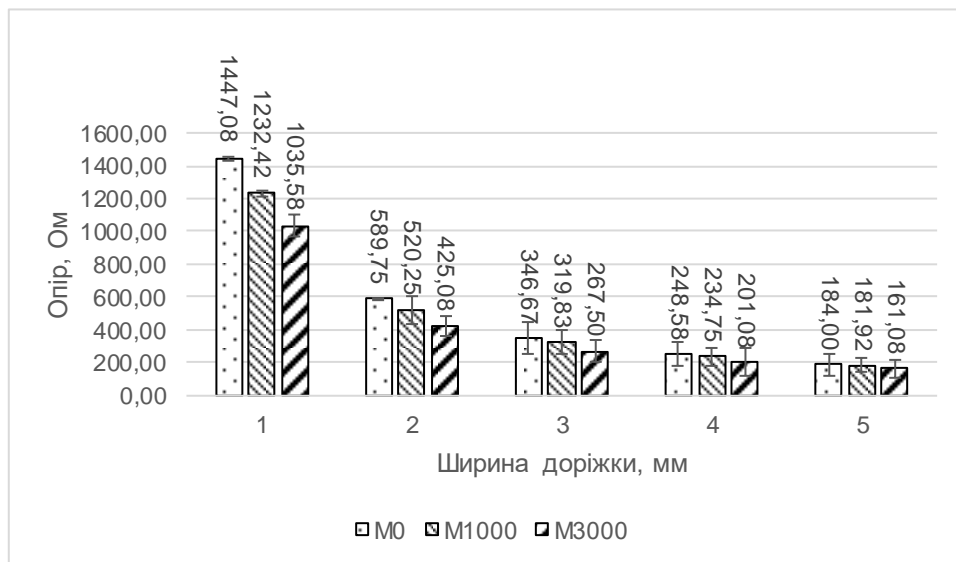


Рис. 4.8. Залежність електричного опору струмопровідних доріжок від режиму обробки поверхні паперової основи (матовий папір), групи: М0 – матовий папір без обробки, М1000 – матовий папір, обробка 1000Вт, М3000 – матовий папір, обробка 3000Вт

На рис. 4.10 наведено результати дослідження впливу режимів обробки коронним розрядом на зміну шорсткості поверхні паперових основ груп М і Г та відповідні

значення питомого електричного опору струмопровідних доріжок, нанесених трафаретним друком. Аналіз проведено для зразків різної товщини з інтервалом потужності коронної обробки 0–3000 Вт.

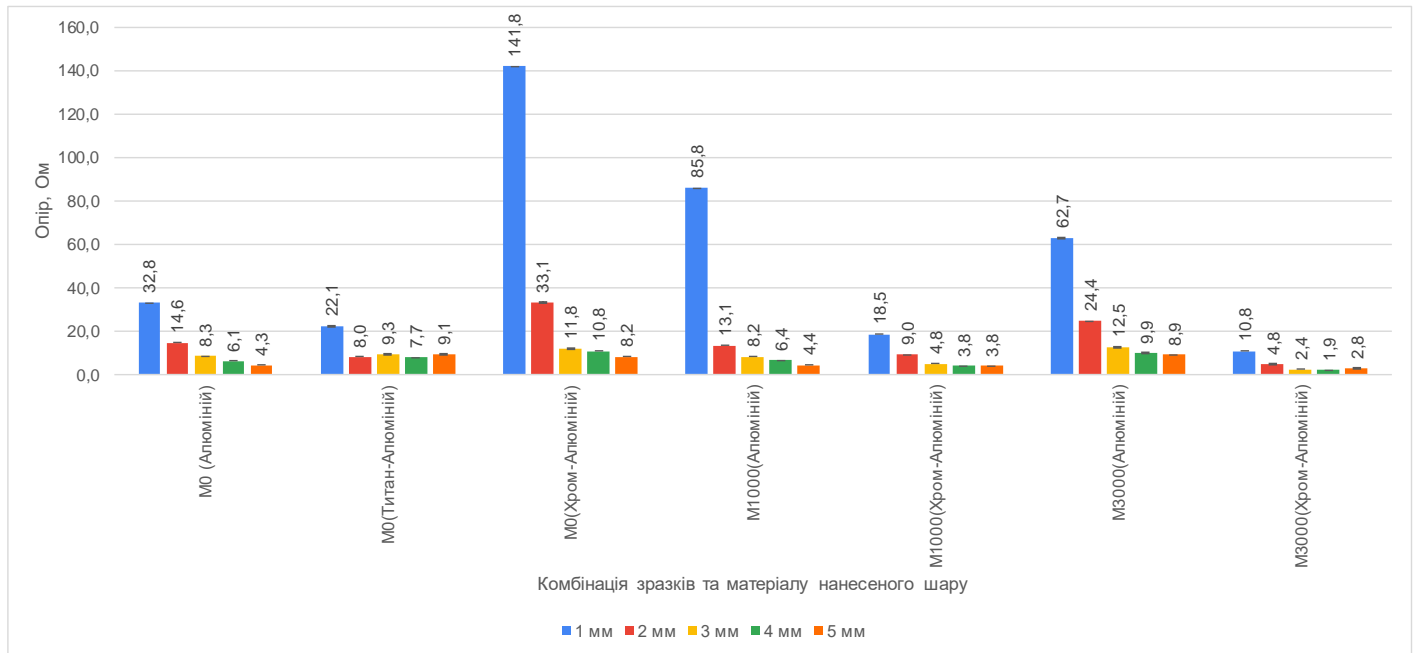


Рис. 4.9. Залежність електричного опору струмопровідних доріжок від режиму обробки поверхні паперової основи для різних комбінацій основи та нанесеного шару, для ширин доріжок 1–5 мм, групи: М0 – матовий папір без обробки, М1000 – матовий папір, обробка 1000Вт, М3000 – матовий папір, обробка 3000Вт

Отримані результати демонструють, що зі збільшенням потужності коронного розряду відбувається загальна тенденція до зростання мікросорсткості поверхні паперових основ обох груп. Водночас для основ групи М характерні дещо вищі абсолютні значення шорсткості порівняно з основами групи Г, що пов'язано з особливостями їхньої волокнистої структури та поверхневої обробки.

Зміна шорсткості супроводжується зниженням питомого електричного опору струмопровідних доріжок, що найбільш виражено для зразків меншої товщини. Максимальний ефект зменшення опору спостерігається при обробці в діапазоні 1000–

3000 Вт, що може бути пов'язано з покращенням змочуваності поверхні та підвищенням адгезії графеновмісної фарбової композиції до паперової основи.

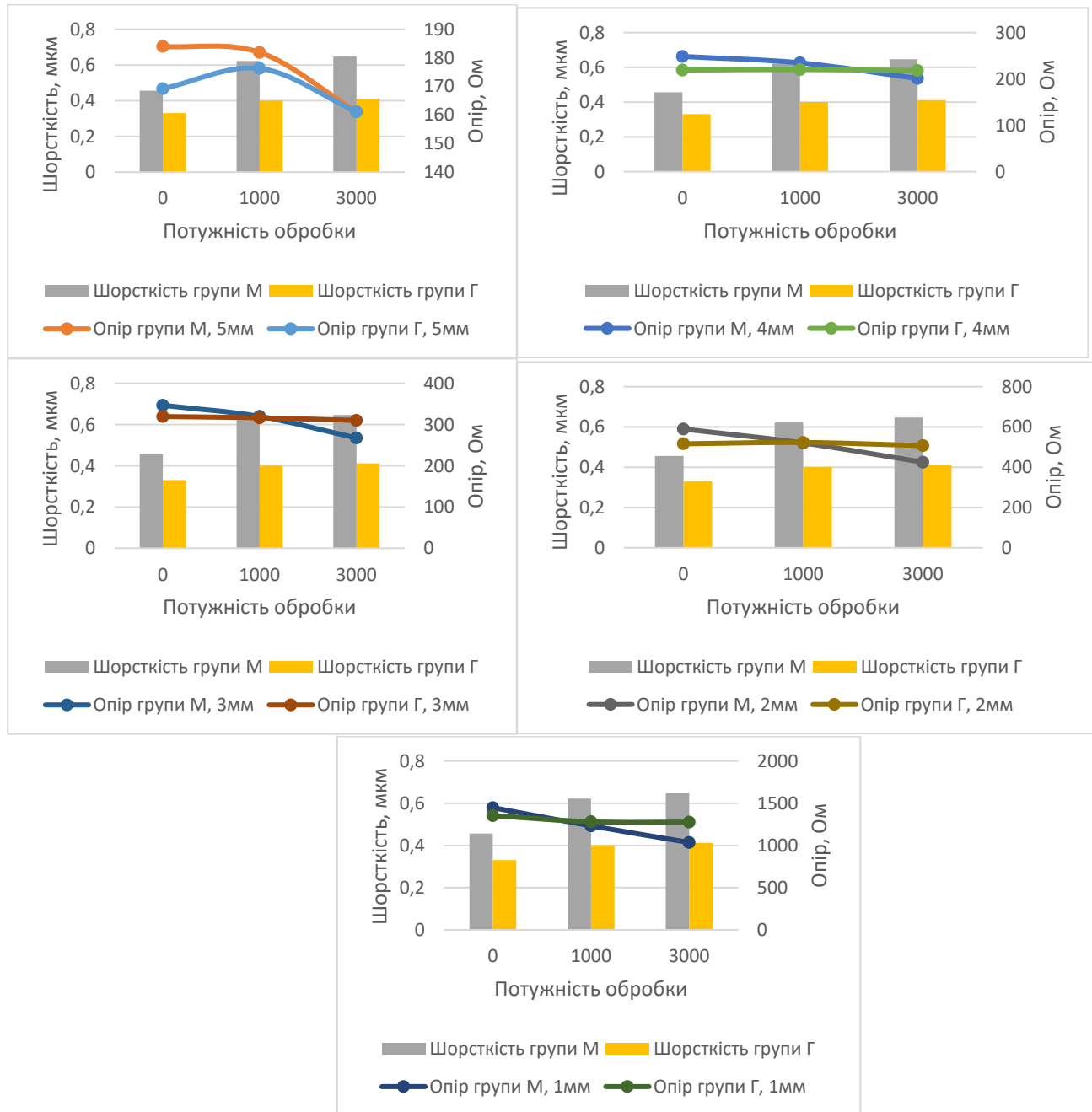


Рис. 4.10. Залежність шорсткості поверхні паперових основ груп М і Г та питомого електричного опору струмопровідних доріжок від потужності коронної обробки для доріжок шириною 5 мм, 4 мм, 3 мм, 2 мм та 1 мм.

На рис. 4.11 показано залежність питомого електричного опору струмопровідних доріжок та кута змочування паперових основ груп М і Г від потужності обробки для зразків різної товщини.

Аналіз отриманих даних демонструє, що зі збільшенням потужності коронного розряду кут змочування поверхні зменшується для обох груп паперу, що свідчить про зростання поверхневої енергії та поліпшення змочувальних властивостей. Найбільш помітне зменшення кута змочування спостерігається при переході від необроблених зразків до зразків, оброблених при потужності 3000 Вт.

Зменшення кута змочування корелюється зі зниженням питомого електричного опору струмопровідних доріжок. Це підтверджує припущення про те, що покращена змочуваність поверхні сприяє більш рівномірному розподілу фарбової композиції та формуванню суцільнішої провідної структури.

Рис. 4.12 присвячено аналізу зміни фрактальної розмірності поверхні паперових основ груп М і Г залежно від потужності обробки та відповідних значень питомого електричного опору струмопровідних доріжок.

Отримані результати демонструють зростання фрактальної розмірності поверхні зі збільшенням потужності обробки, що свідчить про ускладнення мікрогеометрії поверхневого шару. Водночас паперові основи групи М характеризуються вищими значеннями фрактальної розмірності порівняно з групою Г практично в усьому досліджуваному діапазоні потужностей.

Паралельно зі зростанням фрактальної розмірності спостерігається тенденція до зменшення питомого електричного опору струмопровідних доріжок. Така залежність може бути пояснена збільшенням ефективної площі контакту між фарбовою композицією та паперовою основою, що сприяє формуванню більш стабільних електропровідних шляхів.

Виявлена кореляція між фрактальною розмірністю поверхні та електричними характеристиками підтверджує доцільність використання параметрів фрактального аналізу для оцінювання ефективності обробки паперових основ.

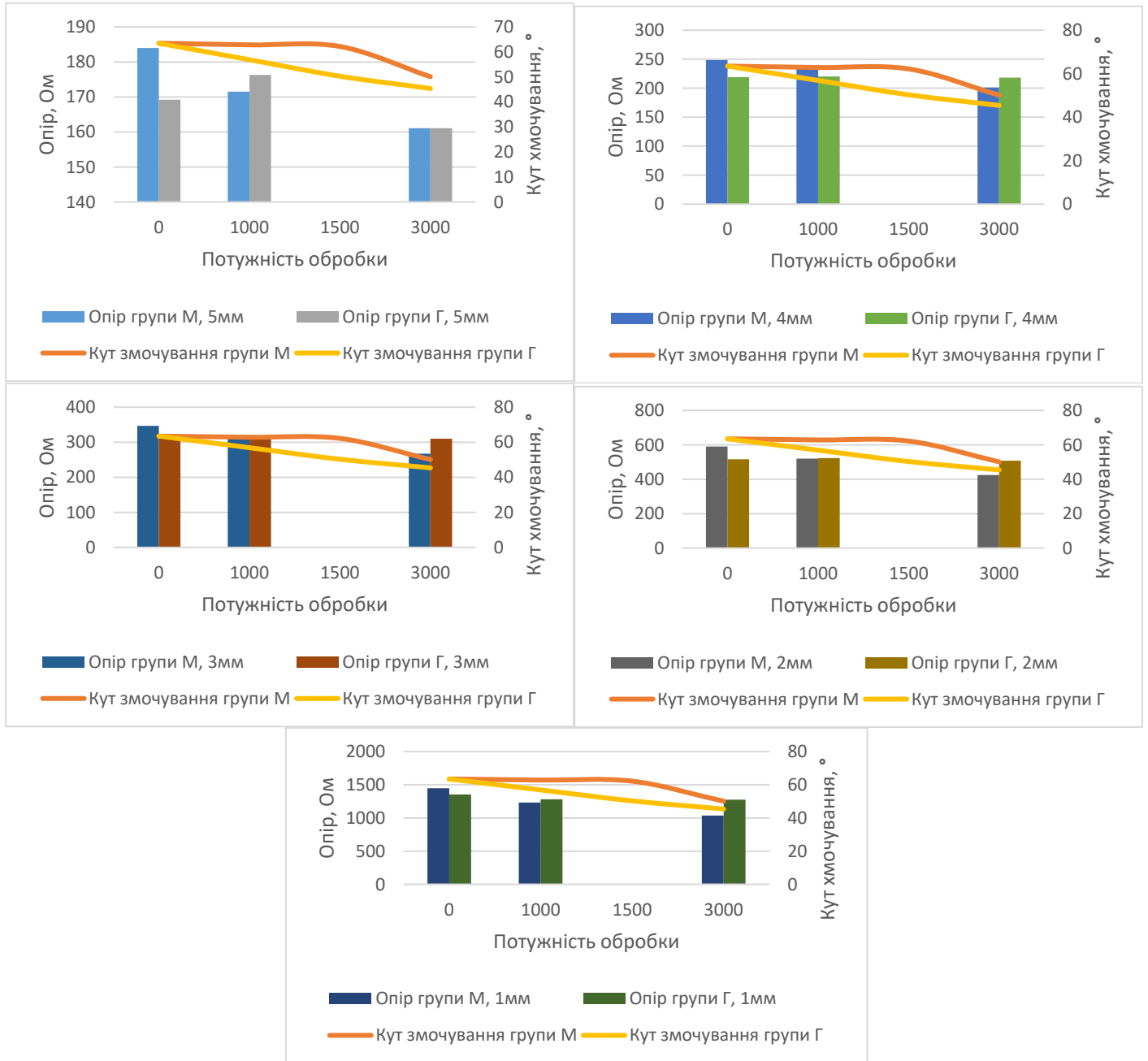


Рис. 4.11. Зміна питомого електричного опору струмопровідних доріжок та кута змочування паперових основ груп М і Г залежно від потужності обробки для доріжок різної ширини.

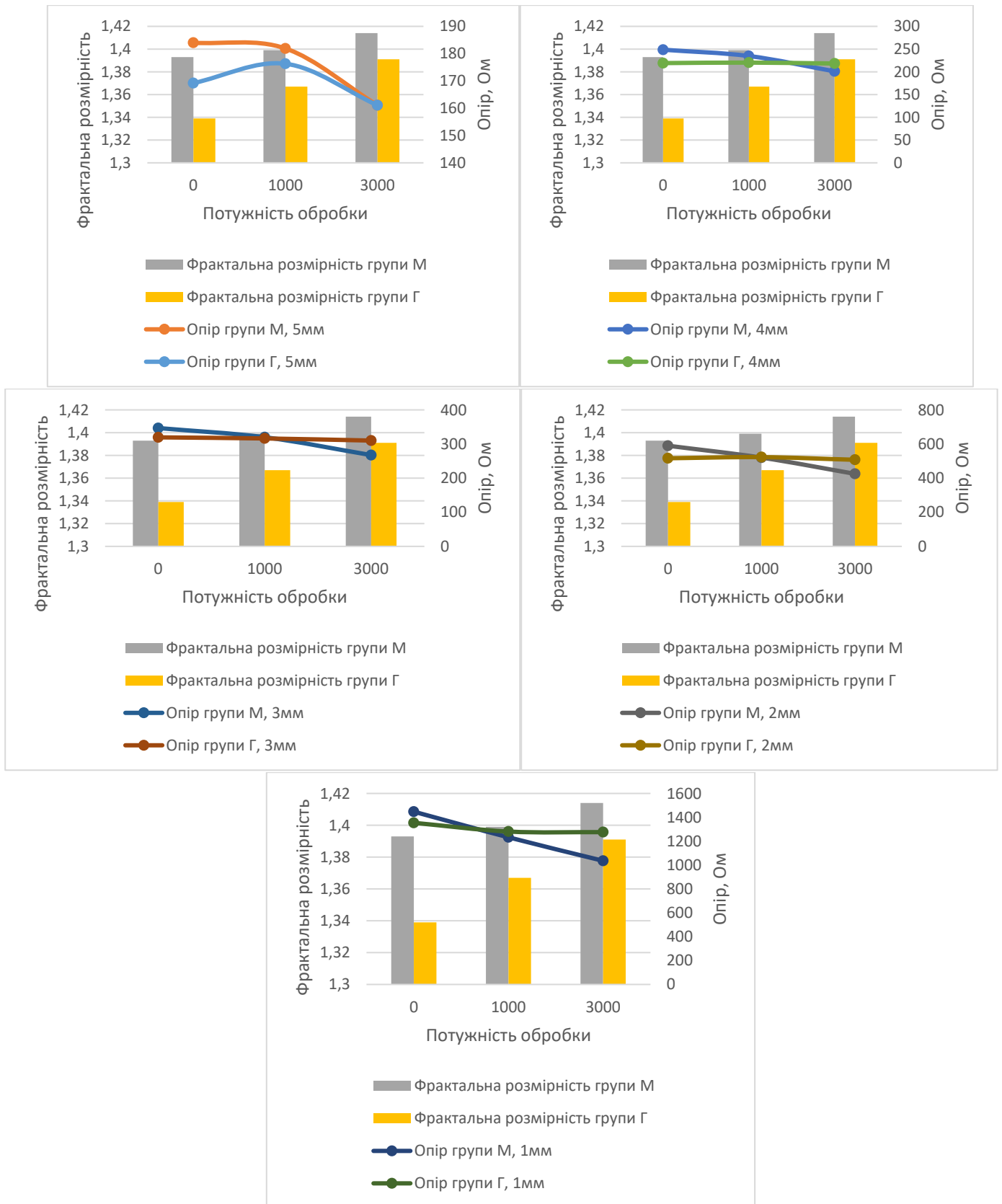


Рис. 4.12. Залежність фрактальної розмірності поверхні паперових основ груп М і Г та питомого електричного опору струмопровідних доріжок від потужності обробки для доріжок різної ширини.

На рис. 4.10–4.12 наведено узагальнені залежності, побудовані на основі середніх значень параметрів шорсткості поверхні, електричного опору струмопровідних доріжок, кута змочування та фрактальної розмірності, отриманих у відповідних серіях експериментів. Зазначені середні значення були визначені з використанням статистичної обробки експериментальних даних, а довірчі інтервали для кожного з окремих параметрів наведені на попередніх етапах аналізу (шорсткість – рис. 3.3; питомий електричний опір – рис. 4.7–4.8; кут змочування – рис. 3.11; фрактальна розмірність – рис. 4.3). З огляду на багатопараметричний характер представлених залежностей та з метою збереження наочності графічного подання, довірчі інтервали безпосередньо на рис. 4.10–4.12 не наведено.

4.3.3 Дослідження якості нанесених струмопровідних доріжок після обробки коронним розрядом

Відповідно до результатів експериментів та проведеного аналізу визначено, що загальною проблемою є неможливість встановити, який вид основи і його режими обробки забезпечують найкращі експлуатаційні властивості струмопровідних доріжок, нанесених трафаретним друком. Тому оцінювання якості певного варіанта виготовлення таких доріжок розглянуто як задача багатокритеріального вибору, як запропоновано в [156], тобто ситуація прийняття рішення на заданій множині допустимих альтернатив $X = \{x_i | i = \overline{1, m}\}$ (видів паперу, технологічних режимів обробки коронним розрядом тощо) за потреби врахування сукупності властивостей (показників провідності до зношування та після) альтернатив, котрі характеризуються вектором цільових функцій $\bar{f}_i = \{f_j(x_i) | j = \overline{1, n}; x \in X\}$, де $f_j(x_i)$ відповідає j -й властивості, за якою оцінюється альтернатива $x_i \in X$. Далі по тексту часткову цільову функцію позначатимемо: $f_j(x_i) = x_{ij}$.

Отже, запропоновано оцінювати експлуатаційні характеристики готового виробу за сукупністю низки властивостей, виміряних до та після випробувань: абсолютні

значення опору (АЗ); зміна опору (ДЗ) внаслідок імітації механічного (Мех) та термічного (Терм) впливу, визначена після першого (1ц) і другого (2ц) циклів імітації; показник рівня відмов (РВ) зразків після циклів імітації зношування із використанням забрудненої суміші.

Процес прийняття рішення на множині альтернатив, які характеризуються певною кількістю часткових критеріїв, запропоновано здійснити через зведення цих критеріїв до одного узагальненого критерію – комплексного показника експлуатаційних властивостей елементів друкованої електроніки, який буде побудовано згорткою багатьох критеріїв і визначенням функції корисності.

Використано адитивну згортку показників, де всі показники є дестимуляторами (4.3):

$$F(x_i) = \sum_{j=k+1}^m \omega_j \frac{x_{\min j}}{x_{ij}} \quad (4.3)$$

Вагомість кожного з показників вважаємо однаковою, тоді $\omega_i = \frac{1}{n}$.

Функції корисності альтернатив наведено на рис. 4.13.

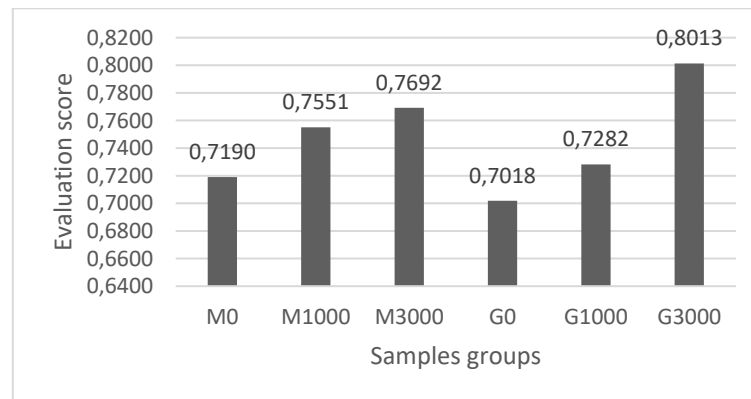


Рис. 4.13. Результати багатофакторного оцінювання

Найбільш ефективний результат загалом, а також відносно до початкового варіанту, показала група зразків Г3000.

4.4 Практичні рекомендації щодо удосконаленого технологічного процесу нанесення елементів друкованої електроніки

На підставі аналізу та узагальнення результатів дисертаційного дослідження сформовано практичні рекомендації щодо удосконаленого технологічного процесу виготовлення елементів друкованої електроніки методом трафаретного друку на гнучких основах. Запропоновані рекомендації враховують як морфологічні властивості основи, так і параметри попередньої та постдрукарської обробки, що дозволяє досягти покращених електрофізичних характеристик готового виробу.

Раціональним варіантом основи рекомендовано вважати саме глянцевої папір. За результатами багатофакторного аналізу він продемонстрував кращі показники початкового опору, стабільності при термомеханічних впливах та вищу збереженість провідності після впливу хімічних агентів. Це дозволяє розглядати глянцевої основу як пріоритетну для створення відповідних компонентів друкованої електроніки.

Для підвищення змочуваності та активації поверхні основи доцільним є застосування коронного розряду з параметрами 3000 Вт за швидкості протягування полотна 50 м/хв. Обраний режим забезпечує ефективну модифікацію поверхневих властивостей без зайвого енергоспоживання та без надлишкового пошкодження структури паперової основи. Це підтверджується аналізом кута змочування: після досягнення вказаного режиму обробки подальше зростання потужності не призводило до покращення змочуваності, а крива на графіку виходила на плато.

Нанесення провідних елементів рекомендується здійснювати трафаретним способом із використанням чорнил на основі графену. Після нанесення електродів пропонується вдосконалений режим постобробки, який передбачає теплову обробку в умовах вакуумної кліматичної камери. Замість традиційного режиму сушіння, визначеного виробником (15 хв при 45 °С), запропоновано режим циклювання: десять циклів нагрівання до 60 °С тривалістю по 30 хв кожен. Проведене тестування показало, що саме нагрівання сприяє спіканню частинок провідних чорнил, що суттєво покращує провідність сформованих доріжок і їхню стабільність до зовнішніх впливів.

Виключення етапу охолодження після кожного циклу та відмова від базового низькотемпературного режиму дозволяють забезпечити більш глибоку агрегацію частинок графену.

При формуванні схеми удосконаленого процесу враховано результати методу аналізу ієрархій.

Схему процесу зображено на рис. 4.14.

Так, запропонована схема включає охоплює такі удосконалення технологічного процесу: вибір глянцевої основи, обробка коронним розрядом за рекомендованим енергетичним режимом та подальше циклічне нагрівання в умовах вакууму. Це дозволяє підвищити експлуатаційні властивості готових елементів друкованої електроніки, забезпечити стабільність параметрів та знизити ризик відмов під час дії термо- та хімічного навантаження.

Відповідно до вимог удосконаленого технологічного процесу було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматизації обробки діаграми профілю поверхні основи з подальшим вирахуванням фрактальної розмірності. Також програмне забезпечення має можливість вводу даних для розрахунку комплексного показника якості згідно з методологією описаної в 4.3.3. Програмне забезпечення розроблено на базі мови програмування C# в середовищі Unity.

Представлена архітектура алгоритму забезпечує повний цикл обробки графічної інформації: від попередньої фільтрації та виділення значущих об'єктів за кольорними ознаками до отримання кількісних характеристик складності структур через розрахунок фрактальної розмірності.

Розроблена система взаємодії між модулями дозволяє гнучко налаштовувати параметри оброблення в реальному часі, що важливо для аналізу діаграм з високим рівнем візуального шуму. Використання лінійної регресії для інтерпретації результатів методу box-counting забезпечує математичну точність отриманих значень, а впроваджена система валідації введених значень мінімізує ризик виникнення помилок під час виконання обчислень.

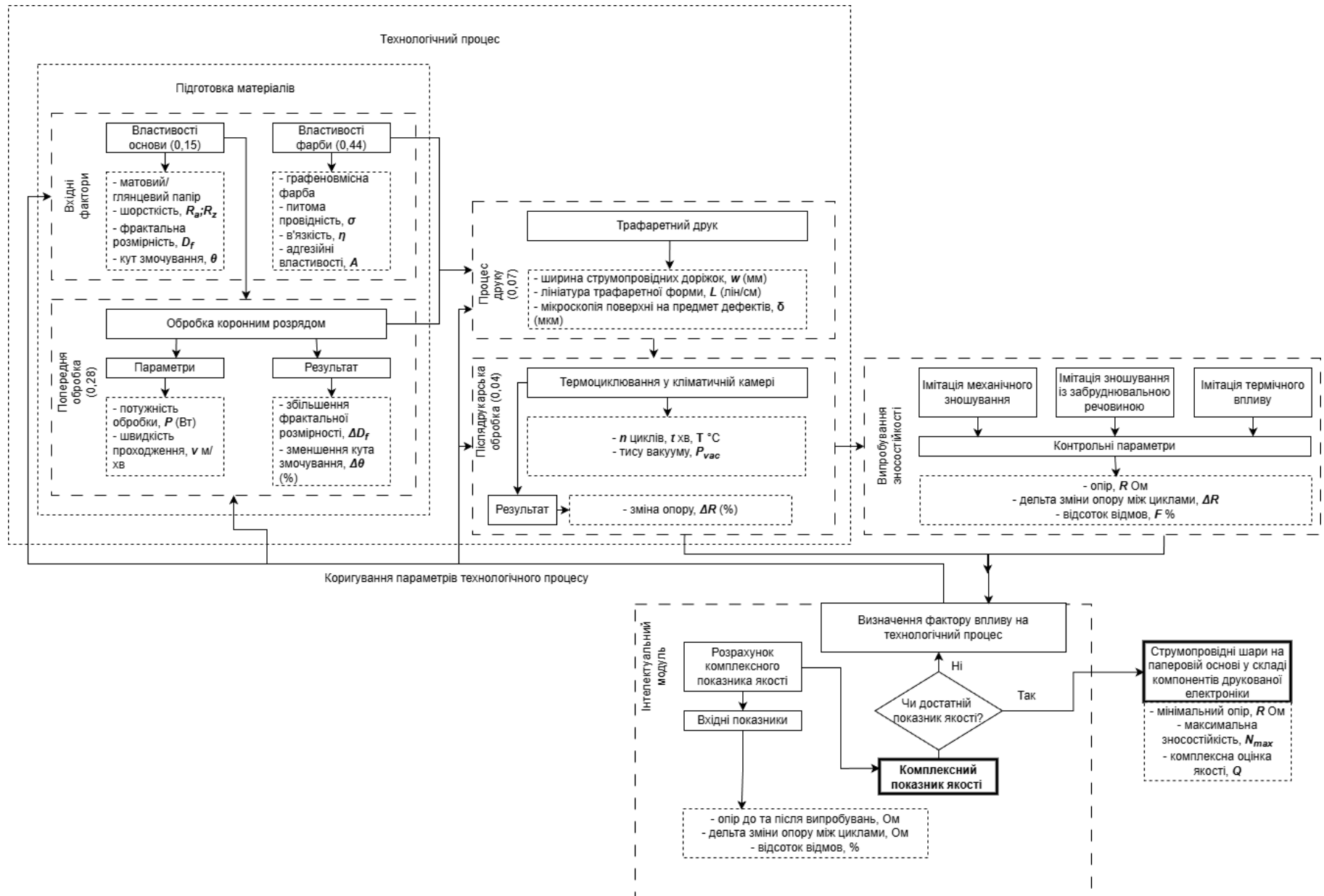


Рис. 4.14. Схема удосконаленого технологічного процесу

Так, сформований алгоритмічний базис є основою для програмної реалізації системи, яка об'єднує в собі інструменти візуального аналізу та математичної статистики, забезпечуючи користувачу можливість проведення комплексного дослідження геометричних властивостей цифрових зображень.

4.5 Висновки до четвертого розділу

1. У результаті проведеного дослідження встановлено вплив обробки паперової основи коронним розрядом на поверхневі параметри та електрофізичні властивості друкованих провідних доріжок, сформованих методом трафаретного друку.

2. Фрактальний аналіз топографії профілю паперу підтвердив зміни мікроструктурної організації поверхні, які характеризуються зменшенням фрактальної розмірності, що вказує на зміну морфологічної складності основи. Параметри питомого опору надрукованих доріжок в оброблених зразках демонструють стабільні значення в межах, допустимих для використання у функціональних елементах друкованої електроніки. Виявлена залежність між режимами обробки (потужністю та швидкістю подачі основи) та зміною електричних характеристик дозволила визначити доцільні параметри коронування.

3. Так, у межах проведеного дослідження підтверджено технологічну доцільність застосування обробки коронним розрядом для стабілізації геометричних та електрофізичних параметрів паперових основ при формуванні електропровідних структур методом трафаретного друку. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої оптимізації виробничих процесів у галузі друкованої електроніки на целюлозовмісних носіях.

ВИСНОВКИ

Проведено комплексне дослідження технологічного процесу формування струмопровідних доріжок друкованої електроніки на паперових основах. У результаті теоретичного аналізу, патентних та експериментальних досліджень обґрунтовано доцільність використання паперу як екологічної, гнучкої та доступної основи для друкованих електронних пристроїв:

1. На основі аналізу сучасних технологічних процесів створення друкованої електроніки встановлено, що трафаретний друк є найбільш доцільним методом для нанесення струмопровідних шарів на паперові основи, забезпечуючи 24/25 балів порівняно зі струминним друком (15/25) та магнетронним напиленням (6/25) за комплексним оцінюванням собівартості, масштабованості, сумісності з папером, механічної стійкості та технологічної складності. Визначено основні проблеми застосування паперових основ у друкованій електроніці, серед яких: висока шорсткість поверхні, пористість та недостатня змочуваність, що негативно впливає на стабільність надрукованих струмопровідних шарів. Обґрунтовано використання обробки коронним розрядом як методу попередньої підготовки целюлозних основ, що дозволило визначити напрями удосконалення технологічних процесів з введенням методів обробки коронним розрядом для промислового використання паперу як базового матеріалу в друкованій електроніці. Водночас попередню обробку паперових основ коронним розрядом розглянуто не як допоміжну операцію, а як ключовий етап стабілізації технологічного процесу, що забезпечує керованість змочування, зменшення впливу природної пористості паперу та підвищення відтворюваності результатів трафаретного друку.

2. Розроблено методику експериментальних досліджень, обрано матеріали (матовий та глянцева папір, графеномісна фарба, матеріали магнетронного напилення), методи (трафаретний друк, магнетронний друк, оптична і контактна профілометрія, мікроскопія, гравіметричний метод, імітація зношування, метод вимірювання опору) та устаткування. Визначено режими підготовки целюлозних основ із використанням обробки коронним розрядом (потужність 3000 Вт, швидкість 50 м/хв) та

післядрукарської термічної обробки (10 циклів \times 30 хв при $+60^{\circ}\text{C}$ у вакуумі), що дозволило оцінити важливі аспекти нанесення струмопровідних доріжок задля подальшого впровадження частини методології в загальний удосконалений процес.

3. Експериментально встановлено взаємозв'язок режимів обробки коронним розрядом паперових основ різного виду з їхніми друкарсько-технічними властивостями. Доведено, що попередня обробка коронним розрядом впливає на фізико-хімічні та фрактальні характеристики поверхні. Зазначені зміни поверхні безпосередньо визначають умови формування суцільного та рівномірного струмопровідного шару під час трафаретного друку, що зменшує випадковість розтікання фарби та локальних дефектів, притаманних необробленим паперовим основам. Збільшення фрактальної розмірності для потужності обробки 3000 Вт порівняно з необробленими зразками становить 1% для матового паперу і 3% для глянцевого. Зменшення кута змочування становить 26% для матового паперу і 39% для глянцевого, що сприяє кращій змочуваності й адгезії провідної фарби та забезпечує підвищення стабільності електричних характеристик друкованих провідних шарів. Набула подальшого розвитку методологія оцінки параметрів шорсткості та змочуваності поверхні паперу за допомогою встановлення фрактальної розмірності на основі безконтактних профілометричних вимірювань.

4. Встановлено взаємозв'язок показників якості струмопровідних доріжок (поверхневий опір $\rho = 13,375\text{--}17,260$ Ом/кв, ширина доріжок $w = 1\text{--}5$ мм) та режимів попередньої обробки основи ($P = 3000$ Вт, $v = 50$ м/хв), геометричних параметрів друкованих ліній (лініатура $L = 60$ ниток/дюйм, товщина $\delta = 8\text{--}12$ мкм), режимів післядрукарської обробки ($T = +60^{\circ}\text{C}$, $n = 10$ циклів), що дозволило забезпечити підвищення відтворюваності й стабільності електричних характеристик друкованих провідних шарів.

5. Розроблено методику імітації експлуатаційних факторів (механічних, хімічних та термічних навантажень) та проведено комплексне багатofакторне оцінювання якості друкованих провідних шарів за результатами вимірювання опору

одразу після нанесення та після випробувань. Встановлено кореляцію між режимами обробки та числовими показниками зміни опору після імітації зношування ($\Delta R = 35\text{--}38\%$ для матового паперу, $32\text{--}36\%$ для глянцевого після термоциклювання). Удосконалено методологію визначення зносостійкості, яка ґрунтується на комплексному оцінюванні якості з врахуванням імітації комплексної дії впливів на зміну електричного опору, що підвищує точність оцінювання інтенсивності деградаційних процесів.

6. Розв'язано багатокритеріальну задачу вибору параметрів обробки паперової основи та використано метод аналізу ієрархій. Встановлено раціональні параметри обробки коронним розрядом ($P = 3000$ Вт, $v = 50$ м/хв), які забезпечують мінімальний опір ($R_{\min} = 161,1\text{ Ом}$) та відтворюваність результатів трафаретного друку (відсоток відмов F менше на 50% порівняно з необробленими основами). Отримано комплекс експериментальних даних результатів опору до та після імітації зношування, що дало змогу обґрунтувати раціональні режими обробки та підвищити комплексний показник якості Q на $5\text{--}10\%$.

7. Розроблено удосконалений технологічний процес трафаретного друку елементів друкованої електроніки на паперових основах, де вперше застосовано цілеспрямовану попередню обробку поверхні паперу коронним розрядом ($P = 3000$ Вт, $v = 50$ м/хв) та термічну обробку в кліматичній камері (10 циклів \times 30 хв при $T = +60^\circ\text{C}$ у вакуумі). Технологічна схема передбачає використання глянцевої основи, обробки у рекомендованому енергетичному режимі та циклічного нагрівання, що забезпечує підвищення стабільності (зменшення ΔR на $35\text{--}38\%$), адгезійних властивостей (збільшення A на $25\text{--}30\%$) і провідних властивостей (зменшення R на $15\text{--}20\%$) друкованих елементів. Результати підтверджують можливість промислового використання паперу як базового матеріалу для масштабованого виробництва елементів друкованої електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Printed Electronics Market Size, Share & Trends Analysis Report by Material, by Technology, by Device, by Region, and Segment Forecasts, 2022–2030*. Grand View Research. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/printed-electronics-market> (дата звернення: 27.08.2025).
2. Wiklund J, Karakoç A, Palko T, Yiğitler H, Ruttik K, Jäntti R, Paltakari J. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021; 5(3):89. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030089>
3. Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing Tobias Seifert, Enrico Sowade, Frank Roscher, Maik Wiemer, Thomas Gessner, and Reinhard R. Baumann *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2015 54 (2), 769-779 DOI: 10.1021/ie503636c
4. Corona Ahlbrandt Generators [Електронний ресурс] // Baldwintech. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bwconverting.com/brand/brand-category/baldwin/corona-surface-treatment>
5. Enercon Industries. (1994). Corona Treatment: An Overview. Germantown, WI: Enercon Industries Corporation. <https://www.enerconind.com/web-treating/wp-content/uploads/sites/3/2023/10/Enercon-corona-treating-overview.pdf>
6. **Бардовський Б. О.** Температурна стабілізація провідних доріжок, нанесених трафаретним друком графеновою фарбою на попередньо оброблені паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф. «Кваліологія книги» Львів. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2025.
7. Huang, Q., & Zhu, Y. (2019). Printing conductive nanomaterials for flexible and stretchable electronics: A review of materials, processes, and applications. *Advanced Materials Technologies*, 4(5) doi:10.1002/admt.201800546

8. Khan Y., Ostfeld A.E., Lochner C.M., Pierre A., Arias A.C. Monitoring of Vital Signs with Flexible and Wearable Medical Devices (2016) *Advanced Materials*, 28 (22), pp. 4373 - 4395, DOI: 10.1002/adma.201504366
9. Stoppa, M., & Chiolerio, A. (2014). Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *Sensors*, 14(7), 11957-11992. <https://doi.org/10.3390/s140711957>
10. Binghao Wang, Wei Huang, Lifeng Chi, Mohammed Al-Hashimi, Tobin J. Marks, and Antonio Facchetti *Chemical Reviews* 2018 118 (11), 5690-5754 DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00045
11. Киричок Т. Ю., **Бардовський Б. О.**, Авдяков Є. В., Душейко М. Г. Вплив попередньої обробки паперової основи коронним розрядом на провідність металевих електродів для друкованої електроніки, нанесених магнетронним напиленням. *Технологія і техніка друкарства*, 2024. № (3(85)). С. 110–124. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(85\).2024.319104](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(85).2024.319104).
12. Kyrychok T., Klymenko T., **Bardovskyi B.**, Avdiakov Y. Improving the conductive properties of printed electronics layers by treating paper substrates with corona discharge before screen printing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. № 5(1 (137)). С. 19–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.339913>. Журнал індексується в Scopus (Q3).
13. Kyrychok T., Vorobyova V., Klymenko T., Bilousova A., **Bardovskyi B.**, Volodko B., Avdiakov Y.. "Investigation of adhesive properties of polymer and paper printed substrates treated with corona discharge", *Proc. SPIE 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics*, 1381306 (10 November 2025); <https://doi.org/10.1117/12>.
14. Киричок ТЮ, **Бардовський БО**. Класифікація методів друку та матеріалів друкованої електроніки. *Технологія і техніка друкарства*, 2024 № (4(82)). С. 22–40. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.291596](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596).
15. Киричок Т. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л., Гулевич С. О., Бардовський Б. О., Романюк Ю. В. Дослідження відтворення кольору та штрихових

графічних елементів сувенірної банкотної продукції. Технологія і техніка друкарства, 2023, № (3(81)), С. 4–14. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(81\).2023.293096](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(81).2023.293096).

16. **Бардовський Б. О.** Порівняльний аналіз трафаретного друку та магнетронного напилення для нанесення шарів друкованої електроніки на паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали 25 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.

17. **Бардовський Б. О.** Сучасні тенденції використання полімерних гнучких матеріалів як основи для друкованої електроніки. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

18. **Bardovskyi B.** “Possibilities of printed electronics on paper in a crisis period”, Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті» (Київ, 08–09 грудня 2023 року). / упор. В. Шпак; за загальною редакцією С. Табачнікова. Київ : ДП «Експрес-об’ява», 2023. 169 – 174.

19. **Бардовський Б. О., Авдяков Є. В.** Оцінювання зносостійкості струмопровідних треків на паперовій основі за умов механічного впливу. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. X Міжнар. наук.-техн. конф. (14–17 травня 2025, м. Харків) / редкол.: Чеботарьова І. Б., Вовк О. В., Дейнеко Ж. В. Київ: ТОВ «Видавництво Ліра-К», 2025. Т. 1. 33–34 с.

20. **Курчочок Т., Кlymenko Т., Bardovskyi B.** "Nanoscale fractal analysis of watermarked paper surface topography studied by atomic force microscopy", Proc. SPIE 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 1293815 (5 January 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3012694>.

21. **Бардовський Б. О.** Застосування рядів Фур’є в описі поверхні основ. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

22. Kim S. Inkjet-Printed Electronics on Paper for RF Identification (RFID) and Sensing. *Electronics*. 2020; 9(10):1636. <https://doi.org/10.3390/electronics9101636>
23. Kergoat, L., Piro, B., Berggren, M., Horowitz, G., & Pham, M. -. (2012). Advances in organic transistor-based biosensors: From organic electrochemical transistors to electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(5), 1813-1826. doi:10.1007/s00216-011-5363-y
24. Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2015). Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal*, 15(6), 3164-3185. doi:10.1109/JSEN.2014.2375203
25. A. A. Gupta, A. Bolduc, S. G. Cloutier and R. Izquierdo, "Aerosol Jet Printing for printed electronics rapid prototyping," 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 866-869, doi: 10.1109/ISCAS.2016.7527378.
26. Palavesam, N., Landesberger, C., Kutter, C., & Bock, K. (2015). Finite element analysis of uniaxial bending of ultra-thin silicon dies embedded in flexible foil substrates. Paper presented at the 2015 11th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, PRIME 2015, 137-140. doi:10.1109/PRIME.2015.7251353
27. Glüge J., Scheringer M., Cousins I.T., Dewitt J.C., Goldenman G., Herzke D., Lohmann R., Ng C.A., Trier X., Wang Z. An overview of the uses of per- And polyfluoroalkyl substances (PFAS) (2020) *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22 (12), pp. 2345 – 2373. DOI: 10.1039/d0em00291g
28. Zhang, Y., Zhang, T., Huang, Z., & Yang, J. (2022). A new class of electronic devices based on flexible porous substrates. *Advanced Science*, 9(7) doi:10.1002/advs.202105084
29. Chen, Z., Hwang, H. Y., Jaafar, N., & Rhee, D. M. W. (2016). Study on power cycling reliability of power module with single metal layer flexible substrate by finite element analysis. Paper presented at the Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC, , 2016-February doi:10.1109/EPTC.2015.7412307

30. Avuthu, S.G., Gill, M., Ghalib, N., Sussman, M., Wable, G., Richstein, J., Ph., D., & Jabil (2016). AN INTRODUCTION TO THE PROCESS OF PRINTED ELECTRONICS.
31. Pardo, D. A., Jabbour, G. E., & Peyghambarian, N. (2000). Application of screen printing in the fabrication of organic light-emitting devices. *Advanced Materials*, 12(17), 1249-1252. doi:10.1002/1521-4095(200009)12:17<1249::AID-ADMA1249>3.0.CO;2-Y
32. Brunetti, I., Pimpolari, L., Conti, S., Worsley, R., Majee, S., Polyushkin, D. K., . . . Fiori, G. (2021). Inkjet-printed low-dimensional materials-based complementary electronic circuits on paper. *Npj 2D Materials and Applications*, 5(1) doi:10.1038/s41699-021-00266-5
33. Sari Merilampi, Toni Björminen, Veikko Haukka, Pekka Ruuskanen, Leena Ukkonen, Lauri Sydänheimo, Analysis of electrically conductive silver ink on stretchable substrates under tensile load, *Microelectronics Reliability*, Volume 50, Issue 12, 2010, Pages 2001-2011, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.06.011>.
34. Kang, Dong & Gonzalez-Garcia, Lola & Kraus, Tobias. (2022). Soft electronics by inkjet printing metal inks on porous substrates. *Flexible and Printed Electronics*. 7. 10.1088/2058-8585/ac8360.
35. Krajewski, A. S., Magniez, K., Helmer, R. J. N., & Schrank, V. (2013). Piezoelectric force response of novel 2d textile based pvdf sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(12), 4743-4748. doi:10.1109/JSEN.2013.2274151
36. Huang, L., Huang, Y., Liang, J., Wan, X., & Chen, Y. (2011). Graphene-based conducting inks for direct inkjet printing of flexible conductive patterns and their applications in electric circuits and chemical sensors. *Nano Research*, 4(7), 675-684. doi:10.1007/s12274-011-0123-z
37. Choi, W., Kim, M. -, Na, Y. -, & Lee, S. -. (2010). Complementary transfer-assisted patterning of high-resolution heterogeneous elements on plastic substrates for flexible electronics. *Organic Electronics*, 11(12), 2026-2031. doi:10.1016/j.orgel.2010.09.017
38. Hakola, Elina & Lyytikäinen, Johanna & Tanninen, Panu & Eiroma, Kim & Leminen, Ville & Immonen, Kirsi & Hakola, Liisa. (2022). Suitability of Paper-Based Substrates for Printed Electronics. *Materials*. 15. 957. 10.3390/ma15030957.

39. Cui Z., Han Y., Huang Q., Dong J., Zhu Y. Electrohydrodynamic printing of silver nanowires for flexible and stretchable electronics (2018) *Nanoscale*, 10 (15), pp. 6806 - 6811, DOI: 10.1039/c7nr09570h
40. Kang K., Xie S., Huang L., Han Y., Huang P.Y., Mak K.F., Kim C.-J., Muller D., Park J. High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity (2015) *Nature*, 520 (7549), pp. 656 - 660. DOI: 10.1038/nature14417
41. Wang, X., Zhu, M., Li, X., Qin, Z., Lu, G., Zhao, J., Zhang, Z., Ultralow-Power and Radiation-Tolerant Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Electronics Utilizing Enhancement-Mode Carbon Nanotube Transistors on Paper Substrates. *Adv. Mater.* 2022, 34, 2204066. <https://doi.org/10.1002/adma.202204066>
42. Xu S., Wu Z., Lu H., Han Y., Long G., Chen X., Han T., Ye W., Wu Y., Lin J., Shen J., Cai Y., He Y., Zhang F., Lortz R., Cheng C., Wang N. Universal low-temperature Ohmic contacts for quantum transport in transition metal dichalcogenides (2016) *2D Materials*, 3 (2), art. no. 021007. DOI: 10.1088/2053-1583/3/2/021007
43. Zhou Y., Li Q., Dang B., Yang Y., Shao T., Li H., Hu J., Zeng R., He J., Wang Q. A Scalable, High-Throughput, and Environmentally Benign Approach to Polymer Dielectrics Exhibiting Significantly Improved Capacitive Performance at High Temperatures (2018) *Advanced Materials*, 30 (49), art. no. 1805672, Cited 423 times. DOI: 10.1002/adma.201805672
44. Wang T.-Y., Meng J.-L., He Z.-Y., Chen L., Zhu H., Sun Q.-Q., Ding S.-J., Zhou P., Zhang D.W. Ultralow Power Wearable Heterosynapse with Photoelectric Synergistic Modulation (2020) *Advanced Science*, 7 (8), art. no. 1903480, DOI: 10.1002/advs.201903480
45. Технологічні основи електроніки. Книга 1. Технологія виробництва мікросхем [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Електронні прилади та пристрої» / А. І. Кузьмичев, Л. Д. Писаренко, Л. Ю. Цибульський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,74 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 127 с. – Назва з екрана.

46. Синтез та діагностика наноструктур: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», спеціалізації «Інформаційні технології проектування в електроніці та наносистемах»/ А.В. Іващук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 420 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – с. 41

47. Kumar P., Seema, Gupta M., Avasthi S. Fully dense, highly conductive nanocrystalline TiN diffusion barrier on steel via reactive high power impulse magnetron sputtering (2021) *Thin Solid Films*, 722, art. no. 138578, DOI: 10.1016/j.tsf.2021.138578

48. Zhang H., Geng S., Chen G., Wang F. La–Cr coating deposited by DC magnetron sputtering for solid oxide fuel cell interconnect applications (2024) *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, pp. 864 - 869, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.356

49. Shen Y., Wen M., Xu Y., Li S. Ru thin films prepared by RF magnetron sputtering with Ru targets of different microstructures (2023) *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 41 (4), art. no. 043408, DOI: 10.1116/6.0002583

50. Rossnagel, S.. (2003). Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies. *Journal of Vacuum Science & Technology A - J VAC SCI TECHNOL A*. 21. 10.1116/1.1600450.

51. Kleemann H., Krechan K., Fischer A., Leo K. A Review of Vertical Organic Transistors (2020) *Advanced Functional Materials*, 30 (20), art. no. 1907113 DOI: 10.1002/adfm.201907113

52. John A. Rogers *et al.* Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science* 327,1603-1607(2010).DOI:[10.1126/science.1182383](https://doi.org/10.1126/science.1182383)

53. Sajedi-Moghaddam A., Rahmanian E., Naseri N. Inkjet-printing technology for supercapacitor application: Current state and perspectives (2020) *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12 (31), pp. 34487 - 34504, DOI: 10.1021/acsami.0c07689

54. Lin Y., Gao Y., Fang F., Fan Z. Recent progress on printable power supply devices and systems with nanomaterials (2018) *Nano Research*, 11 (6), pp. 3065 - 3087, DOI: 10.1007/s12274-018-2068-y

55. Musselman K.P., Uzoma C.F., Miller M.S. Nanomanufacturing: High-Throughput, Cost-Effective Deposition of Atomic Scale Thin Films via Atmospheric Pressure Spatial Atomic Layer Deposition (2016) *Chemistry of Materials*, 28 (23), pp. 8443 - 8452, DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b03077
56. Derby, Brian. (2008). Bioprinting: Inkjet Printing Proteins and Hybrid Cell-Containing Materials and Structures. *Journal of Materials Chemistry*. 18. 5717-5721. 10.1039/B807560C.
57. Sirringhaus, Henning. (2014). 25th Anniversary Article: Organic Field-Effect Transistors: The Path Beyond Amorphous Silicon. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.). 26. 10.1002/adma.201304346.
58. Hyun W.J., Secor E.B., Hersam M.C., Frisbie C.D., Francis L.F. High-resolution patterning of graphene by screen printing with a silicon stencil for highly flexible printed electronics (2015) *Advanced Materials*, 27 (1), pp. 109 - 115, DOI: 10.1002/adma.201404133
59. Cummins G, Desmulliez MP (2012), "Inkjet printing of conductive materials: a review". *Circuit World*, Vol. 38 No. 4 pp. 193–213, doi: <https://doi.org/10.1108/03056121211280413>
60. Krebs F.C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(4), 394–412. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004>
61. Li D., Lai W.-Y., Zhang Y.-Z., Huang W. Printable Transparent Conductive Films for Flexible Electronics(2018) *Advanced Materials*, 30 (10), art. no. 1704738 DOI: 10.1002/adma.201704738
62. Krebs F.C., Fyenbo J., Jørgensen M. Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: Methods and manufacture using flexographic printing, slot-die coating and rotary screen printing (2010) *Journal of Materials Chemistry*, 20 (41), pp. 8994 – 9001 DOI: 10.1039/c0jm01178a
63. Kim J., Imani S., de Araujo W.R., Warchall J., Valdés-Ramírez G., Paixão T.R.L.C., Mercier P.P., Wang J. Wearable salivary uric acid mouthguard biosensor with

integrated wireless electronics (2015) *Biosensors and Bioelectronics*, 74, pp. 1061 - 1068, DOI: 10.1016/j.bios.2015.07.039

64. Yamashita, Takahiro & Takamatsu, Seiichi & Okada, Hiroyuki & Itoh, Toshihiro & Kobayashi, Takeshi. (2016). Ultra-Thin Piezoelectric Strain Sensor Array Integrated on a Flexible Printed Circuit Involving Transfer Printing Methods. *IEEE Sensors Journal*. 16. 1-1. 10.1109/JSEN.2016.2578936.

65. Kaindl R., Dergez D., Gupta T., Pei S., Hou P.-X., Du J., Liu C., Fickl B., Nastran M., Liu Y., Blümel A., Eder D., Liu J., Ren W., Hartmann P., Waldhauser W., Kieslinger D., Bayer B.C. Screen and stencil printed graphene heat spreaders on printed circuit boards for lowering of light emitting diode temperatures (2025) *Surface and Coatings Technology*, 517, art. no. 132821, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2025.132821

66. Rubio, J. C., & Bolduc, M. (2025). Screen Printing for Energy Storage and Functional Electronics: A Review. *Electronic Materials*, 6(2), 7. <https://doi.org/10.3390/electronicmat6020007>

67. Hu, G., Kang, J., Ng, L. W. T., Zhu, X., Howe, R. C. T., Jones, C. G., . . . Hasan, T. (2018). Functional inks and printing of two-dimensional materials. *Chemical Society Reviews*, 47(9), 3265-3300. doi:10.1039/c8cs00084k

68. Tai, T. S., He, S., & Ghazinouri, B. (2023). 2D FPCB micromirror for scanning LIDAR. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 33(12) doi:10.1088/1361-6439/ac9e62

69. Shao, Y., Wei, L., Wu, X., Jiang, C., Yao, Y., Peng, B., . . . Ping, J. (2022). Room-temperature high-precision printing of flexible wireless electronics based on MXene inks. *Nature Communications*, 13(1) doi:10.1038/s41467-022-30648-2

70. Rogdakis K., Psaltakis G., Fagas G., Quinn A., Martins R., Kymakis E. Hybrid chips to enable a sustainable internet of things technology: opportunities and challenges (2024) *Discover Materials* , 4 (1), art. no. 4, DOI: 10.1007/s43939-024-00074-w

71. Mathews S.A., Charipar N.A., Metkus K., Piqué A. Manufacturing microelectronics using 'Lase-and-Place' (2007) *Photonics Spectra*, 41 (10), pp. 70 - 74,

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-35648971165&partnerID=40&md5=541fc4ff79ed8870d542a6293194d17f>

72. Latest advances in substrates for flexible electronics. (2007) *Journal of the Society for Information Display*, 15 (12), pp. 1075-1083.

73. Yamada, T. et al. Nanoparticle chemisorption printing technique for conductive silver patterning with submicron resolution. *Nat. Commun.* 2016; 7:11402. doi: 10.1038/ncomms11402.

74. Bhattacharjee M., Nikbakhtnasrabadi F., Dahiya R. Printed Chipless Antenna as Flexible Temperature Sensor (2021) *IEEE Internet of Things Journal*, 8 (6), art. no. 9321456, pp. 5101 - 5110, DOI: 10.1109/JIOT.2021.3051467

75. Palmieri, E.; Montaina, L.; Polino, G.; Bonomo, M.; Giordanengo, G.; Barolo, C.; Paradossi, G.; Brunetti, F.; Tamburri, E.; Orlanducci, S. Engineered Surface for High Performance Electrodes on Paper. *Appl. Surf. Sci.* 2023, 608, 155117.

76. Harvey, J. E. (2003-2004). *Printing Electronics*. Media4theWorld, LLC.

77. Barras, R., Cunha, I., Gaspar, D., Fortunato, E., Martins, R., & Pereira, L. (2017). Printable cellulose-based electroconductive composites for sensing elements in paper electronics. *Flexible and Printed Electronics*, 2(1), 014006. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa5ef9>

78. Schmidt, W., & Barth-Gremmel, K. (2012, September 20). Support for Electronic Circuits (Publication No. US2012234585A1). European Patent Office. [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=2012234585A1&KC=A1&FT=D&ND=4&date=20120920&DB=EPODOC&locale=en_EP]

79. Simegnaw, A. A., Malengier, B., Rotich, G., Tadesse, M. G., & Van Langenhove, L. (2021). Review on the integration of microelectronics for e-textile. *Materials*, 14(17) doi:10.3390/ma14175113

80. V. OrtsMercadillo, K. C. Chan, M. Caironi, A. Athanassiou, I. A. Kinloch, M. Bissett, P. Cataldi, Electrically Conductive 2D Material Coatings for Flexible and Stretchable

Electronics: A Comparative Review of Graphenes and MXenes. *Adv. Funct. Mater.* 2022, 32, 2204772. <https://doi.org/10.1002/adfm.202204772>

81. Gupta, S., Navaraj, W. T., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. (2018). Ultra-thin chips for high-performance flexible electronics. *Npj Flexible Electronics*, 2(1) doi:10.1038/s41528-018-0021-5

82. Milind V. Kulkarni, Sanjay K. Apte, Sonali D. Naik, Jalindar D. Ambekar, Bharat B. Kale, Ink-jet printed conducting polyaniline based flexible humidity sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 178, 2013, Pages 140-143, ISSN 0925-4005, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.12.046>.

83. Kyoung-Hwan Shin, Joonhyuk Cho, Jyongsik Jang, Hyun Suk Jang, Eung Suk Park, Kigook Song, Sung Hyun Kim, Polypyrrole top-contact electrodes patterned by inkjet printing assisted vapor deposition polymerization in flexible organic thin-film transistors, *Organic Electronics*, Volume 13, Issue 5, 2012, Pages 715-720, ISSN 1566-1199, <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2012.01.006>.

84. Herrera, M.A., Mathew, A.P. & Oksman, K. Barrier and mechanical properties of plasticized and cross-linked nanocellulose coatings for paper packaging applications. *Cellulose* 24, 3969–3980 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1405-8>

85. Patir, N., Cheng, H.S. (1979). Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces. *Journal of Lubrication Technology*, 101(2), 220–229.

86. Banaś, W., & Wiśniewski, P. (2017). Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning. *Precision Engineering*, 50, 49–59. Elsevier B.V.

87. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика / Дубовик В.П., Юрик І.І. – К.: А.С.К., 2006. – 648 с.

88. Ряди Фур'є. Практикум. /Т.В. Авдєєва, О.Б. Качаєнко- К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 88 с. – Бібліогр.: с. 88. –100 пр.

89. Ramos, C.A., Davim, J.P., & Silva, R. (2017). Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations. *Measurement*, 102, 81–91. Elsevier Ltd.
90. Kyrychok, T., Klymenko, T., Talimonova, N., & Svezhentsova, K. (2019). Determining special features in the topography of paper with water marks at the micro- and nanolevels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(12 (98)), 28–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164071>
91. PTC. (2025). *Mathcad Prime* (версія 11.0) [Комп'ютерна програма]. PTC Inc.
92. ISO. (1997). *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997)*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/10132.html>
93. ISO 4288:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*. Geneva: International Organization for Standardization, 1996.
94. TAPPI T555 om-15. *Roughness of paper and paperboard (Sheffield method)*. Atlanta: TAPPI Press, 2015.
95. ISO 5636-3:2013. *Paper and board — Determination of air permeance (medium range) — Part 3: Bendtsen method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2013
96. ISO 5636-5:2013. *Paper and board — Determination of air permeance (medium range) — Part 5: Gurley method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
97. TAPPI T460 om-16. *Air resistance of paper (Gurley method)*. Atlanta: TAPPI Press, 2016.
98. ISO 15989:2004. *Paper and board — Determination of wettability by measurement of the contact angle*. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

99. ASTM D7334-08(2013). Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates, and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
100. TAPPI T458 om-16. Surface wettability of paper (Cobb test). Atlanta: TAPPI Press, 2016.
101. ISO 12625-1:2016. Tissue paper and tissue products — Part 1: General guidance on test methods. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.
102. Хаджинова, С. Є., Золотухіна, К. І., Кушлик, Б. Р., & Кушлик-Дивульська, О. І. (2018). Виявлення залежностей експериментальних досліджень крайового кута змочування. Технологія і техніка друкарства, (4(62), 27–38. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(62\).2018.167228](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(62).2018.167228)
103. ISO 2409:2020. Paints and varnishes — Cross-cut test. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.
104. ASTM D3359-22 ASTM International. ASTM D3359-22. Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. 7 p.
105. ISO 7784-2:2006 International Organization for Standardization. ISO 7784-2:2006. Paints and varnishes — Determination of resistance to abrasion — Part 2: Rotating abrasive rubber wheel method. Geneva: ISO, 2006. 9 p.
106. TAPPI T830 om-18. Ink rub resistance of printed paper. Atlanta: TAPPI Press, 2018.
107. ASTM D5264-98(2011). Standard Practice for Abrasion Resistance of Printed Materials by the Sutherland Rub Tester. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
108. ISO 1518-1:2019. Paints and varnishes — Determination of scratch resistance — Part 1: Constant-loading method. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
109. ASTM D7027-13. Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

110. ISO 2812-1:2007 International Organization for Standardization. ISO 2812-1:2007. Paints and varnishes — Determination of resistance to liquids — Part 1: Immersion in liquids other than water. Geneva: ISO, 2007. 5 p.

111. ASTM D1308-21. Standard Test Method for Effect of Household Chemicals on Clear and Pigmented Organic Finishes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

112. Aurore Denneulin, Julien Bras, Anne Blayo, Charles Neuman, Substrate pre-treatment of flexible material for printed electronics with carbon nanotube based ink, Applied Surface Science, Volume 257, Issue 8, 2011, Pages 3645-3651, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.097>.

113. Rivnay J., Inal S., Salleo A., Owens R.M., Berggren M., Malliaras G.G. Organic electrochemical transistors (2018) Nature Reviews Materials, 3, art. no. 17086, DOI: 10.1038/natrevmats.2017.86

114. Lahti J., Tuominen M., Penttinen T., Rasanen J.P., Kuusipalo J. The effects of corona and flame treatment: Part 2. PE-HD and PP coated papers (2009) TAPPI European PLACE Conference, 1, pp. 278 – 314

115. Lahti J., Savolainen A., Räsänen J.P., Suominen T., Huhtinen H. The role of surface modification in digital printing on polymer-coated packaging boards (2004) Polymer Engineering and Science, 44 (11), pp. 2052 - 2060, DOI: 10.1002/pen.20209

116. Brzeziński S., Połowiński S., Kowalczyk D., Karbownik I., Malinowska G. Effect of the corona discharge treatment of polyester fabrics on their adhesive properties (2009) Fibres and Textiles in Eastern Europe, 75 (4), pp. 98 – 102

117. Khan Y., Thielens A., Muin S., Ting J., Baumbauer C., Arias A.C. A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics (2020) Advanced Materials, 32 (15), art. no. 1905279, DOI: 10.1002/adma.201905279

118. ДСТУ 3575-97 "Патентні дослідження. Основні положення і порядок проведення" [Чинний від 1998-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1997. 13 с. (Інформація та документація).

119. Espacenet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://worldwide.espacenet.com/>.

120. Google LLC.. Google Patents [Онлайн]. Режим доступу:
<https://patents.google.com/>.

121. Відомство США з питань патентів і торгових марок.. Patent Public Search Basic [Онлайн]. Режим доступу:
<https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html>.

122. Круль, Й., де Вільгельм Бернардус, Х., МАТТЕРС, М., Харт, К. М., & де Лейв Дагоберт Міхель, М. (2003). Паперова основа для інтегральних схем. Patent No. UA57835C2. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/UA57835C2/ru?q=UA57835>

123. Ning, H., Zeng, Y., Yao, R., Zheng, Z., Zhang, H., Fang, Z., Chen, G., & Peng, J. (2018). A kind of nanometer paper substrate film transistor. Patent No. CN207217549U. Chinese Patent Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/CN207217549U/en?q=CN207217549>

124. Chartier, C., Depres, G., & Vau, J.-M. (2017). Verwendung von gedruckter elektronik auf papier zum einbetten einer schaltung in kunststoffformteile (Patent No. EP3187322A1). European Patent Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/EP3187322A1/de?q=EP3187322A1>

125. Depres, G., & Vau, J.-M. (2018). Paper-in-harz-elektronik - verfahren zur herstellung davon und anwendung in hergestellten produkten (Patent No. EP3405011A1). European Patent Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/EP3405011A1/de?q=EP3405011A1>

126. Stephens, J. (1995). *Screen printing: Contemporary methods and materials*. Delmar Cengage Learning.

127. UGENT Conductive Silkscreen Ink UGDC033SSCDSV. Ugent Tech. Products. URL: <https://www.ugenttech.com/products/ugent-conductive-silkscreen-ink-ugdc033sscdsv-high-conductivity-ink-for-abs-pc-pet-more-1kg-pack> (дата звернення: 25.01.2025).

128. Верстат для трафаретного друку HSP 1x1 P. Li-Tech. URL: <https://li-tech.com.ua/ua/p1307219832-stanok-dlya-trafaretnoj.html> (дата звернення: 20.12.2025).
129. International Electrotechnical Commission. IEC 60093:1980. Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials. Geneva: IEC, 1980. 21 p.
130. ISO 2808:2019 International Organization for Standardization. ISO 2808:2019. Paints and varnishes — Determination of film thickness. Geneva: ISO, 2019. 34 p.
131. ISO 15184:2012 International Organization for Standardization. ISO 15184:2012. Paints and varnishes — Determination of film hardness by pencil test. Geneva: ISO, 2012. 8 p.
132. Adobe Inc. Adobe Illustrator 2026. Version 30.0. Adobe Inc., 2025.
133. Електронний підручник Основи наноелектроніки: у 2 кн. Кн.2 «Матеріали і наноелектронні технології : Підручник / Ю.І. Якименко, Д.М. Заячук, В. М. Співак, А.Т. Орлов, О. В. Богдан, В.М. Коваль. – сайт <http://www.fel.ntukpi.kiev.ua>. – К: НТУУ «КПІ», 2016. - 400 с.: іл..
134. ASTM A753/A753M – 20. Standard Specification for Soft Magnetic Alloys (UNS K93600, K94840, K95560, K92650, K93050, and K95660). – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. – 8 p.
135. ISO 209-1:2018. Aluminium and aluminium alloys — Chemical composition and form of wrought products — Part 1: Chemical composition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018.
136. ASTM A481-05(2020). Standard Specification for Chromium Metal. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. Available at: <https://www.astm.org/a0481-05r20.html>.
137. ASTM B265-20. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. Available at: <https://www.astm.org/b0265-20.html>.

138. LAPSHUDA, V. & Koval, Viktoriia & Dusheiko, Mykhailo & YASIIIEVYCH, Yu & Barbash, Valerii & YASHCHENKO, O.. (2024). Nanocellulose-Based Resistive Sensors for Air Humidity Measurements. *Science and Innovation*. 20. 49-60. 10.15407/scine20.04.049.

139. Linevych, Yaroslav & Koval, Viktoriia & Dusheiko, Mykhailo & Lakyda, Maryna. (2024). Humidity Diode Sensors Based on 1D Nanosized Silicon Structures. *Science and Innovation*. 20. 67-81. 10.15407/scine20.03.067.

140. Linevych, Yaroslav & Koval, Viktoriia & Dusheiko, Mykhailo & Lakyda, Maryna & Yasiievych, Yurii & Maliuta, Serhii V. (2024). Silicon 1D Structures for Resistive and Diode Temperature Sensors. *Nanosistemi Nanomateriali Nanotehnologii*. 22. 335. 10.15407/nnn.22.02.335.

141. Autodesk AutoCAD 2024 [Електронний ресурс]: система автоматизованого проектування / Autodesk Inc. – Версія 2024. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview> (дата звернення: 22.07.2025).

142. Aliyev E., Ismayilova S. Determination of the Ink Layer Thickness, Taking into Account the Surface Roughness of the Printing Forum (2024) *Advances in Science and Technology*, 148, pp. 117 - 124. DOI: 10.4028/p-0cW66O

143. Ваги лабораторні серії AD. Настанова з експлуатації : техн. документація / AXIS Sp. z o.o. Гданськ, 2021. 32 с. URL: https://www.axis.pl/images/manuals/AD_EN.pdf (дата звернення: 21.12.2025).

144. Sigeta. *Biogenic Lite 40×–1000× LED Bino Biological Microscope*. Technical specifications. Kyiv, Ukraine. <https://sigeta.com.ua/>

145. ToupTek Photonics. (2025). *ToupView: Camera control and imaging software for microscope cameras*. Retrieved from ToupTek Europe product page and Help Manual. <https://www.touptekphotonics.com/>

146. Воробйова, В. І. Порівняльна характеристика компонентного складу ізопропанольного та водно-ізопропанольного екстрактів вичавків винограду сорту *Vitislabrusca* × *Vitisvinifera* / В. І. Воробйова, О. Е. Чигиринець, А. С. Шакун // *Технічні науки та технології*. – 2017. – № 1 (7). – С. 200-206.

147. Mahr GmbH. (2025). *MarSurf PSI – Mobile Surface Roughness Measurement* [Datasheet]. CDI Web. <https://www.cdiweb.com/datasheets/mahr/ps1.pdf>
148. Zakiev I.M., Gogotsi G. A., Storchak M., Zakiev V.I. Glass Fracture during Micro-Scratching, *Surfaces*, 2020. № 3., P. 211–224. <https://doi.org/10.3390/surfaces3020016>
149. DNIPRO-M – Офіційний інтернет магазин | Інструменти та обладнання. DNIPRO-M – Офіційний інтернет магазин | Інструменти та обладнання. URL: <https://dnipro-m.ua/> (дата звернення: 19.02.2026).
150. Heaney, M. (2003). Electrical Conductivity and Resistivity. *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*.
151. Thakur, Neha & Murthy, Hari. (2021). Nickel-Based Inks for Inkjet Printing: A Review on Latest Trends. *American Journal of Materials Science*. 11. 20-35. [10.5923/j.materials.20211101.03](https://doi.org/10.5923/j.materials.20211101.03).
152. Conti S., Pimpolari L., Calabrese G., Worsley R., Majee S., Polyushkin D.K., Paur M., Pace S., Keum D.H., Fabbri F., Iannaccone G., Macucci M., Coletti C., Mueller T., Casiraghi C., Fiori G. Low-voltage 2D materials-based printed field-effect transistors for integrated digital and analog electronics on paper (2020) *Nature Communications*, 11 (1), art. no. 3566, DOI: [10.1038/s41467-020-17297-z](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17297-z)
153. Li Y., Zhao Y., Ruocco A., Wang M., Li B., Akhavan S. Printed Lithography of Graphene-Perovskite Quantum Dot Hybrid Photodetectors on Paper Substrates (2025) *ACS Applied Materials and Interfaces*, 17 (4), pp. 6716 - 6727, DOI: [10.1021/acsami.4c18102](https://doi.org/10.1021/acsami.4c18102)
154. Xie B., Zou P., Yang C. Ultrahigh power graphene based supercapacitor (2015) 16th International Conference on Electronic Packaging Technology, ICEPT 2015, art. no. 7236797, pp. 1211 - 1214, DOI: [10.1109/ICEPT.2015.7236797](https://doi.org/10.1109/ICEPT.2015.7236797)
155. Kim Y.-S., Kwon Y.-T., Mahmood M., Yeo W.-H. Nanomanufacturing of Smart and Connected Bioelectronics Through Nanomaterial Printing, Hybrid Material Integration, and Soft Packaging (2021) *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference, 2021-June*, pp. 1532 - 1537, DOI: [10.1109/ECTC32696.2021.00243](https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00243)

156. Cole, Peter & Turner, Leigh & Hu, Zhonghao & Ranasinghe, Damith. (2011). The Next Generation of RFID Technology.

157. Kyrychok, T.Y. An Analysis of the Precision of Indicators of the General Deterioration of Banknotes. Meas Tech 57, 166–171 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0424-1>

158. ДСТУ 2823–94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1995. — 32 с.

159. Kyrychok, T., Shevchuk, A., Nesterenko, V., & Kyrychok, P. (2014). Banknote Paper Deterioration Factors: Circulation Simulator Method. BioResources,

160. MIL-STD-883G. Method 1010.8: Temperature cycling [Електронний ресурс] – Department of Defense USA, 18 червня 2004. – 8 с. – Режим доступу: <https://q-tech.com/wp-content/uploads/STD-883-1010.pdf>

161. Tabai Espec Corp. (2025). *MC-71 Mini Subzero (64 L) climatic heat-and-cold chamber: $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ stability* [Product data]. <https://www.espec.co.jp/products/qa/qa09/03cfc.html>

162. Feng L., Diao X.-G., Wang T., Liu H.-Y., Kang M.-S. Optical and electrical properties of ZnO:Al films prepared by tilted magnetron sputtering at low temperature (2010) Gongneng Cailiao/Journal of Functional Materials, 41 (SUPPL. 2), pp. 304 – 307.

163. Krawczak E., Agata Z., Gulkowski S., Fave A., Fourmond E. Influence of sputtering deposition parameters on electrical and optical properties of aluminium-doped zinc oxide thin films for photovoltaic applications (2017) E3S Web of Conferences, 22, art. no. 00090, DOI: 10.1051/e3sconf/20172200090

164. Fang G., Li D., Yao B.-L. Magnetron sputtered AZO thin films on commercial ITO glass for application of a very low resistance transparent electrode (2002) Journal of Physics D: Applied Physics, 35 (23), pp. 3096 - 3100, DOI: 10.1088/0022-3727/35/23/310

165. Arapov K., Rubingh E., Abbel R., Laven J., De With G., Friedrich H. Conductive Screen Printing Inks by Gelation of Graphene Dispersions (2016) Advanced Functional Materials, 26 (4), pp. 586 - 593, DOI: 10.1002/adfm.201504030

166. Overgaard M.H., Kühnel M., Hvidsten R., Petersen S.V., Vosch T., Nørgaard K., Laursen B.W. Highly Conductive Semitransparent Graphene Circuits Screen-Printed from Water-Based Graphene Oxide Ink (2017) *Advanced Materials Technologies*, 2 (7), art. no. 1700011, DOI: 10.1002/admt.201700011

167. Yang X., Li X.-M., Kong Q.-Q., Liu Z., Chen J.-P., Jia H., Liu Y.-Z., Xie L.-J., Chen C.-M. One-pot ball-milling preparation of graphene/carbon black aqueous inks for highly conductive and flexible printed electronics (2020) *Science China Materials*, 63 (3), pp. 392 - 402, DOI: 10.1007/s40843-019-1210-3.

168. Киричок Т. Ю. Моделювання структури поверхні банкнотного паперу на основі теорії фракталів / Т. Ю. Киричок, Т. Є. Клименко, О. В. Рибак // Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал. – 2016. – № 2(106) – С. 33–42.

169. Mandelbrot, B.B., Van Ness, J.W. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 10(4), 422-437

170. Sayles, R.S., Thomas, T.R. (1978). Surface topography as a nonstationary random process. *Nature*, 271, 431-434

171. Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, New York

172. Lee, Y.J., Ko, Y.C., Moon, B.G., Kim, H.J. (2023). Surface characterization of paper products by profilometry with a fractal dimension analysis. *BioResources*, 18(2), 3978-3994

173. Thomas Öhlund, Jonas Örtengren, Sven Forsberg, Hans-Erik Nilsson, Paper surfaces for metal nanoparticle inkjet printing, *Applied Surface Science*, Volume 259, 2012, Pages 731-739, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.112>.

174. Tran, B., & Tran, H. (2020). Flexible printed electronics (Patent No. US20200008299A1). United States Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20200008299A1/en?q=US20200008299A1>

175. Min Yang, Min-Woo Chon, Joo-Hyun Kim, Seung-Hyun Lee, Jeongdai Jo, Junyeob Yeo, Seung Hwan Ko, Sung-Hoon Choa, Mechanical and environmental durability of

roll-to-roll printed silver nanoparticle film using a rapid laser annealing process for flexible electronics, *Microelectronics Reliability*, Volume 54, Issue 12, 2014, Pages 2871-2880, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.004>.

176. Lin Z., Huang Y., Duan X. Van der Waals thin-film electronics (2019) *Nature Electronics*, 2 (9), pp. 378 - 388, DOI: 10.1038/s41928-019-0301-7

177. Zhang C.J., McKeon L., Kremer M.P., Park S.-H., Ronan O., Seral-Ascaso A., Barwich S., Coileáin C.Ó., McEvoy N., Nerl H.C., Anasori B., Coleman J.N., Gogotsi Y., Nicolosi V. Additive-free MXene inks and direct printing of micro-supercapacitors (2019) *Nature Communications*, 10 (1), art. no. 1795, DOI: 10.1038/s41467-019-09398-1

178. Gerard O., Numan A., Krishnan S., Khalid M., Subramaniam R., Kasi R. A review on the recent advances in binder-free electrodes for electrochemical energy storage application (2022) *Journal of Energy Storage*, 50, art. no. 104283, DOI: 10.1016/j.est.2022.104283

179. Pan, Jianbiao & Tonkay, Gregory & Quintero, Alejandro. (1998). Screen Printing Process Design of Experiments for Fine Line Printing of Thick Film Ceramic Substrates. *Proc SPIE*. 9. 10.1142/S096031319900012X.

180. Moric, Marko & Majnaric, Igor & Barišić, Mario. (2020). EFFECT OF CORONA POWER ON THE CMY REPRODUCTION QUALITY WITH ELECTROINK PRINTED ON FINE ART PAPER. *Cellulose Chemistry and Technology*. 54. 103-111. 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.12.

181. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

I. Публікації у наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Кurychok Т., Klymenko Т., **Bardovskyi В.**, Avdiakov Y. Improving the conductive properties of printed electronics layers by treating paper substrates with corona discharge before screen printing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2025. № 5(1 (137)). С. 19–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.339913>. Журнал індексується в Scopus (Q3).

Здобувачем здійснено виготовлення експериментальних зразків зі струмопровідними шарами на основі графенової фарби на паперових основах, розроблено методологію трафаретного друку та методики вимірювання електрофізичних характеристик.

Киричок Т. Ю.: сформульовано загальну наукову ідею дослідження щодо впливу попередньої обробки паперових основ коронним розрядом на покращення електрофізичних характеристик струмопровідних шарів.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію дослідження поверхневих характеристик паперових основ, зокрема параметрів мікрорельєфу, шорсткості та інших морфологічних показників, що визначають змочуваність і адгезійні властивості поверхні.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та визначено режими її застосування в межах експериментального дослідження.

II. Публікації у наукових фахових виданнях України:

2. Киричок Т. Ю., **Бардовський Б. О.**, Авдяков Є. В., Душейко М. Г. Вплив попередньої обробки паперової основи коронним розрядом на провідність металевих електродів для друкованої електроніки, нанесених магнетронним напиленням.

Технологія і техніка друкарства, 2024. № (3(85)). С. 110–124. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(85\).2024.319104](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(85).2024.319104).

Здобувачем виконано безпосереднє проведення експериментальних вимірювань електрофізичних характеристик струмопровідних доріжок, зокрема вимірювання електричного опору для різних типів паперових основ і режимів обробки, а також обробку та аналіз отриманих експериментальних даних.

Киричок Т. Ю.: сформульовано загальну методологію дослідження.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та здійснено її практичну реалізацію під час підготовки експериментальних зразків.

Душейко М. Г.: розроблено методологію магнетронного напилення струмопровідних шарів, методу вимірювання електрофізичних властивостей отриманих покриттів.

3. Киричок Т. Ю., Бардовський Б. О. Класифікація методів друку та матеріалів друкованої електроніки. Технологія і техніка друкарства, 2024 № (4(82)). С. 22–40. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.291596](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596).

Здобувачем виконано безпосереднє аналітичне дослідження, включаючи опрацювання та систематизацію літературних джерел, аналіз методів друку, матеріалів основ і друкувальних матеріалів, а також підготовку основного тексту статті та узагальнення отриманих результатів.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальний науковий підхід та концептуальну ідею дослідження.

4. Киричок Т. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л., Гулевич С. О., Бардовський Б. О., Романюк Ю. В. Дослідження відтворення кольору та штрихових графічних елементів сувенірної банкотної продукції. Технологія і техніка друкарства, 2023, № (3(81)), С. 4–14. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(81\).2023.293096](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(81).2023.293096).

Здобувачем безпосередньо проведено мікроскопічні дослідження штрихових графічних елементів, фотофіксація результатів, вимірювання ширини штрихів, участь в аналізі експериментальних даних та інтерпретації результатів.

Киричок Т. Ю.: формування наукової ідеї дослідження, загальне методологічне керівництво роботою, визначення напрямів аналізу та узагальнення результатів.

Клименко Т. Є.: участь у розробленні методики дослідження друкарських відбитків, аналіз впливу друкарсько-технічних характеристик паперу на якість відтворення графічних елементів.

Талімонова Н. Л.: участь у дослідженні кольоровідтворення, обробка та аналіз спектрофотометричних даних, участь у формуванні висновків щодо колірних відмінностей.

Гулевич С. О.: участь у підготовці експериментальних зразків, опрацювання результатів вимірювань, технічна підтримка досліджень.

Романюк Ю. В.: участь у підготовці матеріалів дослідження, аналіз літературних джерел, оформлення окремих розділів статті.

III. Публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій, проіндексованих у базі даних Scopus:

5. Kyrychok T., Vorobyova V., Klymenko T., Bilousova A., **Bardovskyi B.**, Volodko B., Avdiakov Y.. "Investigation of adhesive properties of polymer and paper printed substrates treated with corona discharge", Proc. SPIE 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics, 1381306 (10 November 2025); <https://doi.org/10.1117/12>.

Здобувачем здійснено підготовку паперових зразків до досліджень, включаючи формування експериментальних серій та їх технологічну підготовку перед обробкою і вимірюваннями.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальну наукову концепцію та методологію дослідження, визначено напрям аналізу впливу коронної обробки на змочуваність полімерних і паперових основ та здійснено загальне методичне керівництво роботою.

Воробійова В. І.: розроблено методологію вимірювання кута змочування поверхонь та вибір підходів до оцінювання гідрофільних властивостей матеріалів.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію обробки та інтерпретації експериментальних результатів, здійснено статистичне опрацювання даних і узагальнення отриманих закономірностей.

Білоусова А. О.: виконано безпосередні експериментальні вимірювання кута змочування досліджуваних зразків та підготовку первинних даних для подальшого аналізу.

Володько М. Ю.: виконано підготовку зразків картону, а також виготовлення та інтеграцію адитивних 3D-друкованих елементів у паперові та картонні основи.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки зразків коронним розрядом та здійснено безпосереднє коронування полімерних, паперових і плівкових зразків у межах експериментального дослідження.

6. Куручок Т., Клыменко Т., **Bardovskyi B.** "Nanoscale fractal analysis of watermarked paper surface topography studied by atomic force microscopy", Proc. SPIE 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics, 1293815 (5 January 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3012694>.

Здобувачем розроблено прикладну методологію розрахунку фрактальної розмірності поверхні паперу на основі цифрової обробки профілометричних і мікроскопічних даних та здійснено безпосередній розрахунок фрактальних параметрів і аналіз отриманих результатів.

Киричок Т. Ю.: сформовано загальну наукову концепцію та методологію дослідження, визначено підхід до застосування фрактального аналізу для оцінювання мікрогеометрії поверхні захищеного паперу та здійснено загальне наукове керівництво роботою.

Клименко Т. Є.: розроблено методологію профілометричних і мікроскопічних досліджень, включаючи використання механічної контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії, виконано безпосередні вимірювання профілю поверхні

паперу, а також сформовано загальну методологію визначення фрактальної розмірності поверхні.

IV. Публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій:

7. **Бардовський Б. О.** Порівняльний аналіз трафаретного друку та магнетронного напилення для нанесення шарів друкованої електроніки на паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали 25 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. *Здобувачем проведено порівняльний аналіз трафаретного друку та магнетронного напилення як методів нанесення функціональних шарів друкованої електроніки на паперові основи, з урахуванням технологічних, економічних та експлуатаційних показників, що дозволило обґрунтувати доцільність використання трафаретного друку для паперових гнучких носіїв.*

8. **Бардовський Б. О.** Температурна стабілізація провідних доріжок, нанесених трафаретним друком графеновою фарбою на попередньо оброблені паперові основи. Бардовський Б.О./ Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф. «Кваліологія книги» Львів. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2025. *Здобувачем проаналізовано вплив постдрукарської термічної обробки у кліматичній камері на електричні характеристики струмопровідних доріжок, нанесених графеновою фарбою методом трафаретного друку на попередньо оброблені паперові основи.*

9. **Бардовський Б. О., Авдяков Є. В.** Оцінювання зносостійкості струмопровідних треків на паперовій основі за умов механічного впливу. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. X Міжнар. наук.-техн. конф. (14–17 травня 2025, м. Харків) / редкол.: І.Б. Чеботарьова, О.В. Вовк, Ж.В. Дейнеко. Київ: ТОВ «Видавництво Ліра-К», 2025. Т. 1. 33–34 с.

Здобувачем здійснено підготовку експериментальних зразків зі струмопровідними доріжками на паперовій основі, виконано імітацію механічного зношування та безпосереднє проведення випробувань з оцінювання зносостійкості, а також обробку й аналіз експериментальних результатів.

Авдяков Є. В.: розроблено методологію попередньої обробки паперових основ коронним розрядом та здійснено безпосереднє коронування зразків у межах експериментального дослідження.

10. **Бардовський Б. О.** Сучасні тенденції використання полімерних гнучких матеріалів як основи для друкованої електроніки. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. *Здобувачем проведено аналіз сучасних тенденцій використання гнучких полімерних і паперових матеріалів як основи для друкованої електроніки.*

11. **Бардовський Б. О.** Застосування рядів Фур'є в описі поверхні основ. Бардовський Б.О./ Матеріали 23 Міжнародної наук.-техн. конф. «Друкарство молоде» Київ. – Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. *Здобувачем представлено методологію кількісної оцінки морфології поверхні паперу шляхом апроксимації профілограм за допомогою рядів Фур'є.*

12. **Bardovskyi B.** “Possibilities of printed electronics on paper in a crisis period”, Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Освіта і наука в період глобальних криз та конфліктів у ХХІ столітті» (Київ, 08–09 грудня 2023 року). / упор. В. Шпак; за загальною редакцією С. Табачнікова. Київ : ДП «Експрес-об'ява», 2023. 169 – 174. *Здобувачем проведено комплексний аналіз сучасних технологій нанесення функціональних шарів, включно з друкарськими методами формування елементів електронних схем; обґрунтовано доцільність використання паперу як доступної та екологічної основи в умовах кризових періодів, а також систематизовано вимоги до властивостей матеріалів і основ, що забезпечують стабільність виготовлення пристроїв друкованої електроніки.*

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1. Характеристики струмопровідних доріжок – матриця значень критеріїв альтернатив

Матриця x_{ij}		Властивості										
		Опір доріжки 5мм, Ом	Опір доріжки 4мм, Ом	Опір доріжки 3мм, Ом	Опір доріжки 2мм, Ом	Опір доріжки 1мм, Ом	ДЗ, Мех, 1ц, 5мм	ДЗ, Мех, 1ц, 4мм	ДЗ, Мех, 1ц, 3мм	ДЗ, Мех, 1ц, 2мм	ДЗ, Мех, 1ц, 1мм	
		x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}	x_{i6}	x_{i7}	x_{i8}	x_{i9}	x_{i10}	
Альтернативи	Г0	x_{1j}	169,2	219,2	319,5	319,5	319,5	0,3	0,3	2,7	11,7	26,7
	Г1000	x_{2j}	176,3	220,3	316,3	316,3	316,3	0,0	6,7	2,3	0,0	0,0
	Г3000	x_{3j}	161,1	218,3	310,1	310,1	310,1	0,0	1,0	0,3	-14,7	0,0
	М0	x_{4j}	184	248,6	346,7	346,7	346,7	2,0	0,7	4,7	46,7	31,7
	М1000	x_{5j}	181,9	234,8	319,8	319,8	319,8	8,3	13,0	8,7	10,0	19,0
	М3000	x_{6j}	161,1	201,1	267,5	267,5	267,5	2,0	3,3	7,7	5,0	65,0

Продовження таблиці Б.1

Матриця x_{ij}		Властивості										
		ДЗ, Мех, 2ц, 5мм	ДЗ, Мех, 2ц, 4мм	ДЗ, Мех, 2ц, 3мм	ДЗ, Мех, 2ц, 2мм	ДЗ, Мех, 2ц, 1мм	ДЗ, Терм, 1ц, 5мм	ДЗ, Терм, 1ц, 4мм	ДЗ, Терм, 1ц, 3мм	ДЗ, Терм, 1ц, 2мм	ДЗ, Терм, 1ц, 1мм	
		x_{i11}	x_{i12}	x_{i13}	x_{i14}	x_{i15}	x_{i16}	x_{i17}	x_{i18}	x_{i19}	x_{i20}	
Альтернативи	Г0	x_{1j}	24,3	22,3	29,0	67,3	162,0	20,0	16,3	40,0	50,7	182,0
	Г1000	x_{2j}	0,3	1,0	0,3	21,3	33,3	38,7	41,0	52,7	93,3	246,3
	Г3000	x_{3j}	0,3	0,0	0,3	8,3	6,3	21,7	33,3	50,3	94,0	203,3
	М0	x_{4j}	0,0	0,3	0,0	55,3	29,0	22,7	16,0	64,7	107,7	259,3
	М1000	x_{5j}	2,8	1,3	4,0	34,7	14,5	22,3	33,0	36,0	51,7	176,7
	М3000	x_{6j}	5,7	2,3	8,0	14,0	0,0	33,3	41,7	44,3	71,3	217,0

Продовження таблиці Б.1

Матриця x_{ij}			Властивості						
			ДЗ, Терм, 2ц, 5мм	ДЗ, Терм, 2ц, 4мм	ДЗ, Терм, 2ц, 3мм	ДЗ, Терм, 2ц, 2мм	ДЗ, Терм, 2ц, 1мм	РВ, 1ц	РВ, 2ц
			x_{i21}	x_{i22}	x_{i23}	x_{i24}	x_{i25}	x_{i26}	x_{i27}
Альтернативи	Г0	x_{1j}	8,7	18,7	11,0	45,0	22,3	0,5	0,6
	Г1000	x_{2j}	-2,0	-7,3	-17,3	-38,3	-15,0	0,5	0,1
	Г3000	x_{3j}	3,0	4,3	10,0	-4,0	-12,3	0,3	0,1
	М0	x_{4j}	-1,0	16,3	-8,3	-8,7	19,7	0,1	0,1
	М1000	x_{5j}	-0,3	-1,3	7,0	21,0	23,3	0,2	0,3
	М3000	x_{6j}	-3,3	3,3	9,7	11,7	21,7	0,3	0,2

Продовження таблиці Б.1

Матриця x_{ij}		Властивості										
		АЗ, Мех, 1ц, 5мм	АЗ, Мех, 1ц, 4мм	АЗ, Мех, 1ц, 3мм	АЗ, Мех, 1ц, 2мм	АЗ, Мех, 1ц, 1мм	АЗ, Мех, 2ц, 5мм	АЗ, Мех, 2ц, 4мм	АЗ, Мех, 2ц, 3мм	АЗ, Мех, 2ц, 2мм	АЗ, Мех, 2ц, 1мм	
		x_{i28}	x_{i29}	x_{i30}	x_{i31}	x_{i32}	x_{i33}	x_{i34}	x_{i35}	x_{i36}	x_{i37}	
Альтернативи	Г0	x_{1j}	148,0	179,7	264,3	464,7	1122,0	172,3	202,0	293,3	532,0	1284,0
	Г1000	x_{2j}	146,3	196,3	253,7	409,7	909,0	146,7	197,3	254,0	431,0	942,3
	Г3000	x_{3j}	155,0	211,0	277,3	492,7	1221,3	155,3	211,0	277,7	501,0	1227,7
	М0	x_{4j}	159,7	218,7	331,7	536,7	1142,7	159,7	219,0	331,7	592,0	1171,7
	М1000	x_{5j}	96,0	130,7	184,0	324,3	780,7	108,3	150,3	226,0	348,3	831,7
	М3000	x_{6j}	142,7	177,7	238,0	400,0	911,0	148,3	180,0	246,0	414,0	911,0

Кінець таблиці Б.1

Матриця x_{ij}		Властивості										
		АЗ, Терм, 1ц, 5мм	АЗ, Терм, 1ц, 4мм	АЗ, Терм, 1ц, 3мм	АЗ, Терм, 1ц, 2мм	АЗ, Терм, 1ц, 1мм	АЗ, Терм, 2ц, 5мм	АЗ, Терм, 2ц, 4мм	АЗ, Терм, 2ц, 3мм	АЗ, Терм, 2ц, 2мм	АЗ, Терм, 2ц, 1мм	
		x_{i38}	x_{i39}	x_{i40}	x_{i41}	x_{i42}	x_{i43}	x_{i44}	x_{i45}	x_{i46}	x_{i47}	
Альтернативи	Г0	x_{1j}	90,7	118,7	152,7	276,7	577,3	82,0	100,0	141,7	231,7	555,0
	Г1000	x_{2j}	111,0	119,7	175,0	281,0	692,3	113,0	127,0	192,3	319,3	707,3
	Г3000	x_{3j}	79,3	110,3	177,3	262,7	644,7	76,3	106,0	167,3	266,7	657,0
	М0	x_{4j}	90,0	146,3	177,0	291,3	742,7	91,0	130,0	185,3	300,0	723,0
	М1000	x_{5j}	91,0	123,3	180,7	291,7	651,0	91,3	124,7	173,7	270,7	627,7
	М3000	x_{6j}	98,3	129,3	178,3	274,7	647,3	101,7	126,0	168,7	263,0	625,7

ДОДАТОК В

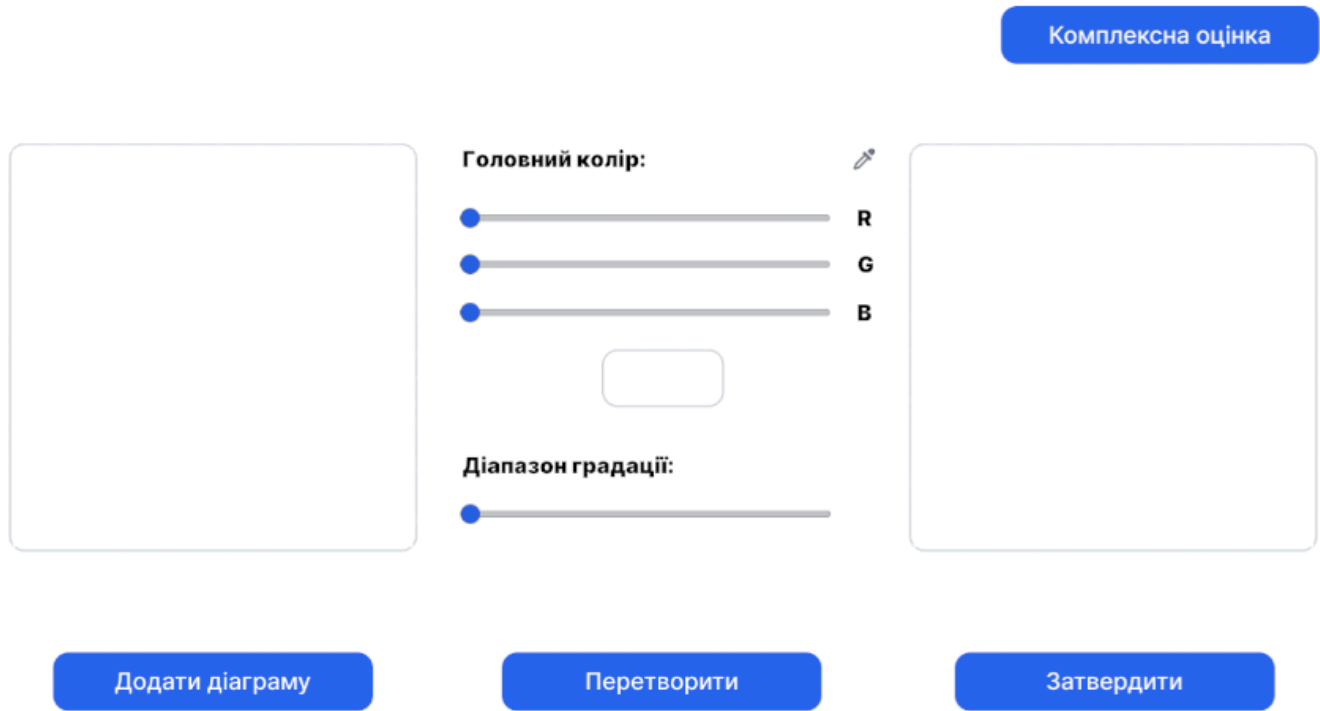


Рис. В.1 – Інтерфейс екрану додавання діаграми і її перетворення

←

2

log [кількість комірок]

0 log [1 / розмір комірки] 1

Кількість ітерацій:

Мінімальний розмір комірки:

Максимальний розмір комірки:

Фрактальна розмірність:

Рівняння прямої:

R²:

Розрахувати

Рис. В.2 – Інтерфейс екрану розрахунку фрактальної розмірності профілю

Введіть значення

Початковий опір:

Блок механічних випробувань

Опір після 1-го циклу:

Опір після 2-го циклу:

Блок випробувань із забруднювальною речовиною

Відсоток відмов після 1-го циклу:

Відсоток відмов після 2-го циклу:

Фрактальна розмірність

Блок термічних випробувань

Опір після 1-го циклу:

Опір після 2-го циклу:

Ширина доріжки, мм:

Комплексна оцінка:

Рис. В.3 – Інтерфейс екрану розрахунку комплексної оцінки

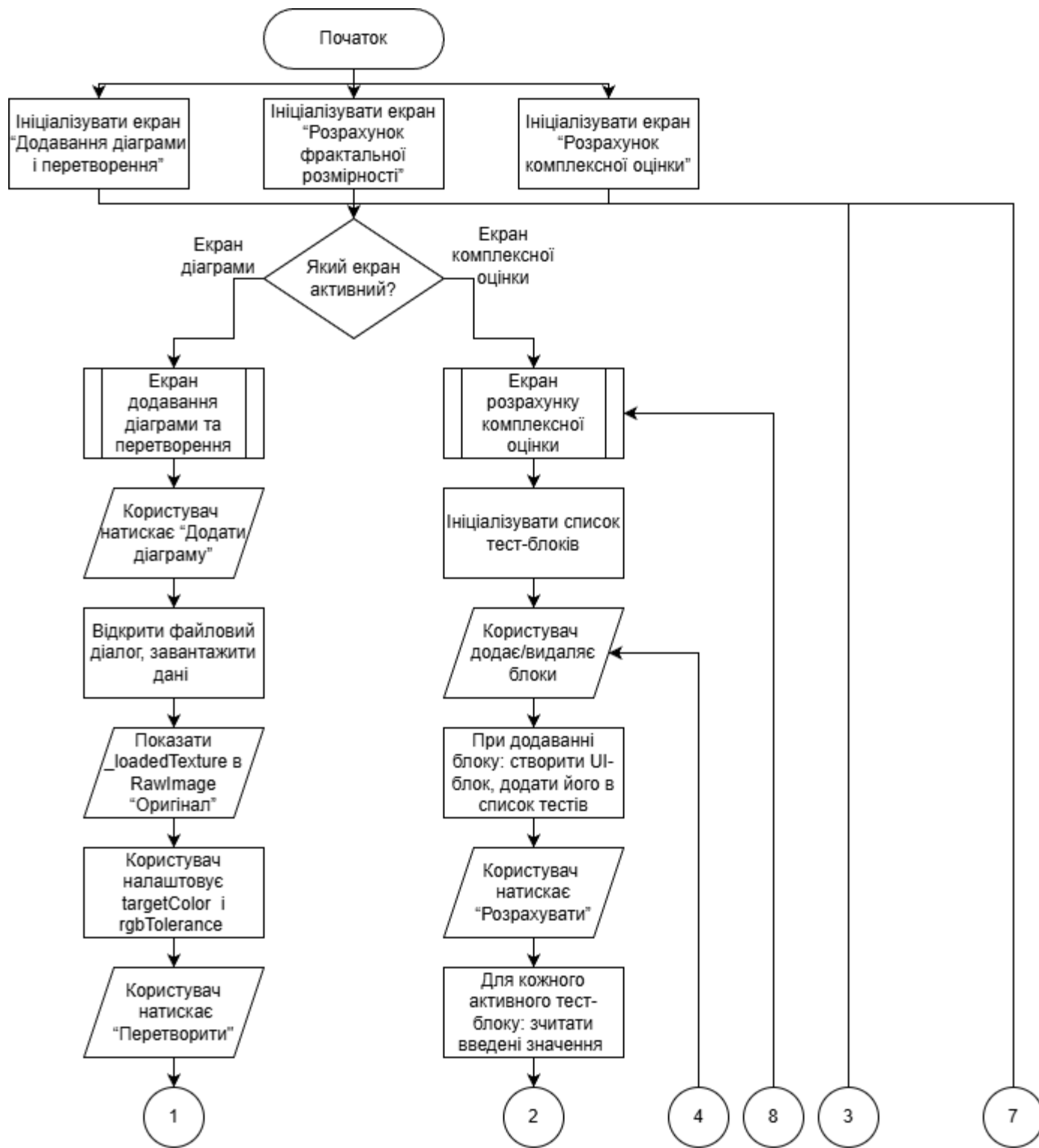


Рис. В.4. Алгоритм управління програмою (перша частина)

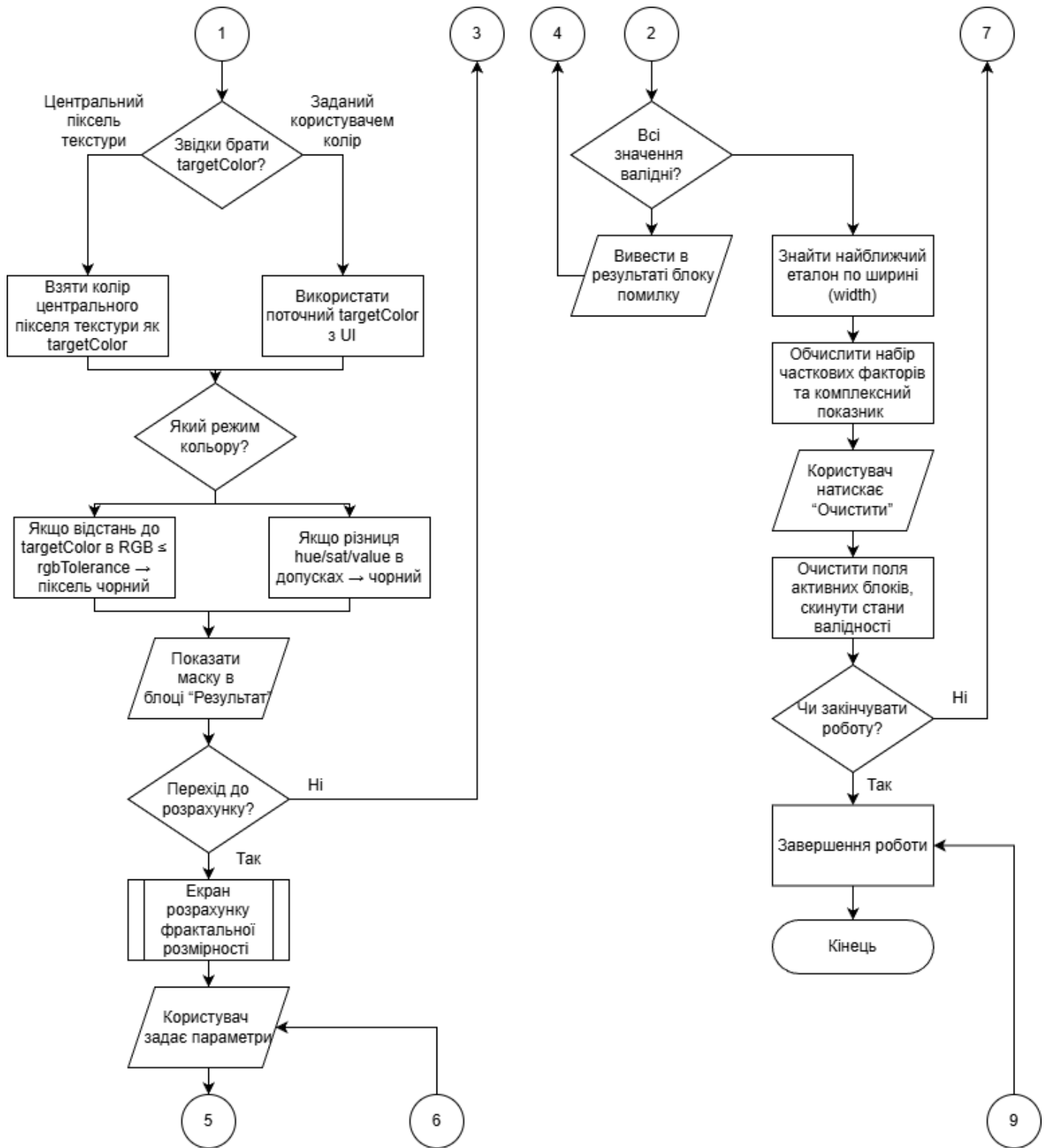


Рис. В.5. Алгоритм управління програмою (друга частина)

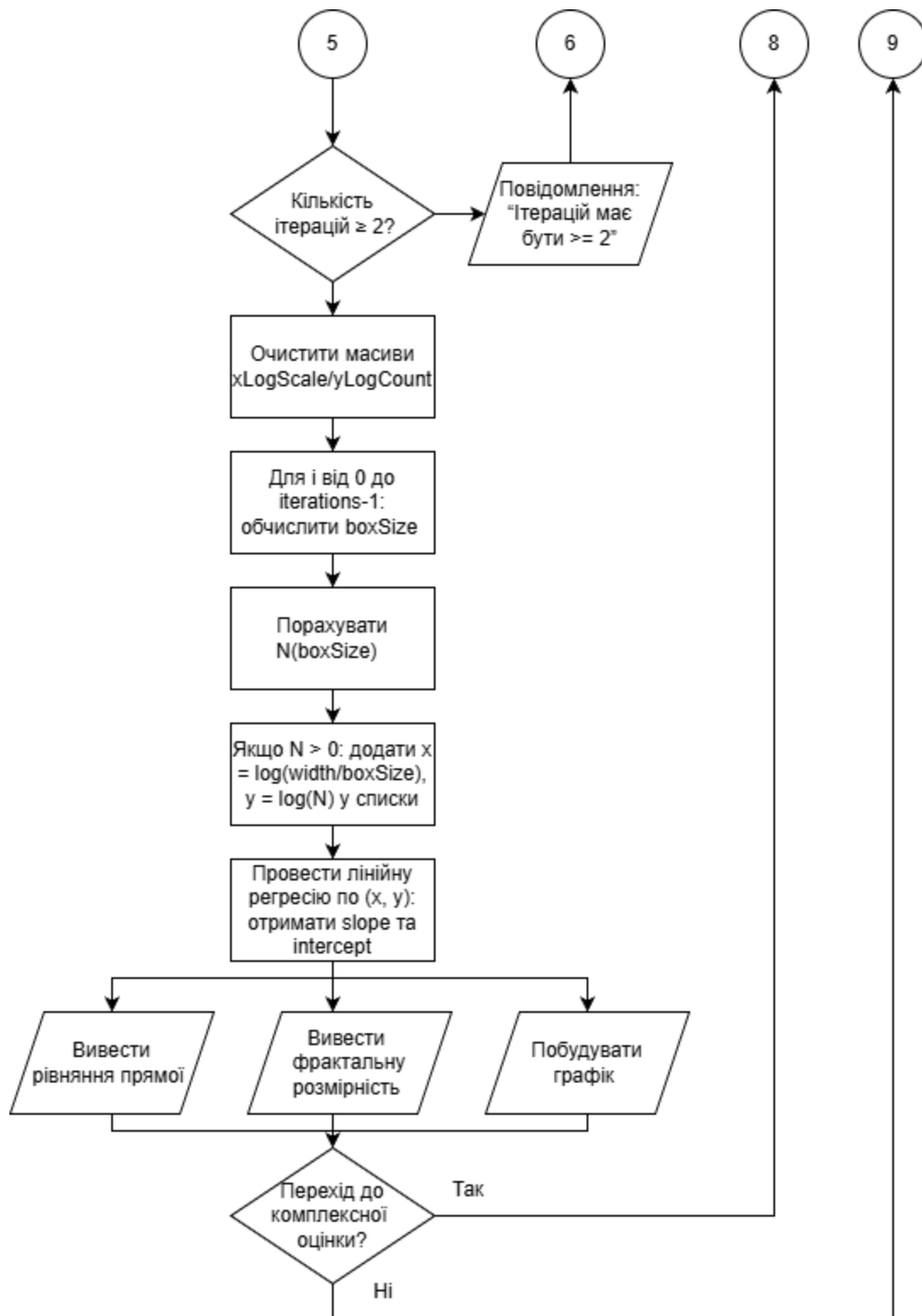


Рис. В.6. Алгоритм управління програмою (третя частина)

ДОДАТОК Д ЛІСТИНГ КОДУ ПРОГРАМИ

```

using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;
using static ResistanceEstimator;

public class BlockManager : MonoBehaviour
{
    [Header("References")]
    [Tooltip("The prefab that will be spawned.")]
    public GameObject blockPrefab;

    [Tooltip("The transform where new blocks will be placed.")]
    public Transform container;

    [Tooltip("The UI Button that triggers spawning.")]
    public Button spawnButton;
    [Tooltip("The UI Button that returns to the previous block.")]
    public Button backButton;
    [Tooltip("The UI Button that moves to the next block.")]
    public Button forwardButton;
    [Tooltip("The UI Button that removes the current block.")]
    public Button removeButton;
    [SerializeField] private ResistanceEstimator _estimator;
    private List<GameObject> _blockHistory = new List<GameObject>();
    private List<GameObject> _forwardHistory = new List<GameObject>();
    void Start()
    {
        if (container.childCount > 0)
        {
            GameObject initialBlock = container.GetChild(0).gameObject;
            _blockHistory.Add(initialBlock);
            TestBlock newTestBlock =
initialBlock.GetComponent<TestBlockComponent>().TestBlock;
            _estimator.AddTestBlock(newTestBlock);
        }

        if (spawnButton != null)
        {
            spawnButton.onClick.AddListener(SpawnNewBlock);
        }

        if (backButton != null)
        {
            backButton.onClick.AddListener(ReturnToPreviousBlock);
        }
        if (forwardButton != null)
        {
            forwardButton.onClick.AddListener(MoveToNextBlock);
        }
        if (removeButton != null)
        {
            removeButton.onClick.AddListener(RemoveCurrentBlock);
        }

        UpdateBackButtonSensitivity();
        UpdateButtonStates();
    }
    public void MoveToNextBlock()
    {

```

```

    if (_forwardHistory.Count == 0) return;

    if (_blockHistory.Count > 0)
    {
        _blockHistory[_blockHistory.Count - 1].SetActive(false);
    }

    int lastForwardIndex = _forwardHistory.Count - 1;
    GameObject nextBlock = _forwardHistory[lastForwardIndex];
    _forwardHistory.RemoveAt(lastForwardIndex);

    _blockHistory.Add(nextBlock);
    nextBlock.SetActive(true);

    UpdateButtonStates();
}
public void RemoveCurrentBlock()
{
    if (_blockHistory.Count == 0) return;

    int lastIndex = _blockHistory.Count - 1;
    GameObject currentBlock = _blockHistory[lastIndex];

    _blockHistory.RemoveAt(lastIndex);

    Destroy(currentBlock);

    if (_blockHistory.Count > 0)
    {
        _blockHistory[_blockHistory.Count - 1].SetActive(true);
    }

    UpdateButtonStates();
}
public void SpawnNewBlock()
{
    if (blockPrefab == null || container == null)
    {
        return;
    }

    if (_blockHistory.Count > 0)
    {
        _blockHistory[_blockHistory.Count - 1].SetActive(false);
    }

    GameObject newBlock = Instantiate(blockPrefab, container.position, container.rotation,
container);
    _blockHistory.Add(newBlock);
    _forwardHistory.Clear();
    UpdateBackButtonSensitivity();
    UpdateButtonStates();

    TestBlock newTestBlock = newBlock.GetComponent<TestBlockComponent>().TestBlock;
    _estimator.AddTestBlock(newTestBlock);
}
public void ReturnToPreviousBlock()
{
    if (_blockHistory.Count < 2) return;

    int lastIndex = _blockHistory.Count - 1;

```

```

    GameObject currentBlock = _blockHistory[lastIndex];
    _blockHistory[lastIndex].SetActive(false);
    _forwardHistory.Add(currentBlock);

    _blockHistory.RemoveAt(lastIndex);

    GameObject previousBlock = _blockHistory[_blockHistory.Count - 1];
    previousBlock.SetActive(true);

    UpdateBackButtonSensitivity();
    UpdateButtonStates();
}
private void OnDestroy()
{
    if (spawnButton != null)
    {
        spawnButton.onClick.RemoveListener(SpawnNewBlock);
    }

    if (backButton != null)
    {
        backButton.onClick.RemoveListener(ReturnToPreviousBlock);
    }

    if (forwardButton != null)
    {
        forwardButton.onClick.RemoveListener(MoveToNextBlock);
    }

    if (removeButton != null)
    {
        removeButton.onClick.RemoveListener(RemoveCurrentBlock);
    }
}
private void UpdateButtonStates()
{
    if (backButton != null)
    {
        backButton.interactable = _blockHistory.Count > 1;
    }
    if (forwardButton != null)
    {
        forwardButton.interactable = _forwardHistory.Count > 0;
    }
    if (removeButton != null)
    {
        removeButton.interactable = _blockHistory.Count > 0;
    }
}

private void UpdateBackButtonSensitivity()
{
    if (backButton != null)
    {
        backButton.interactable = _blockHistory.Count > 1;
    }
}
}
using UnityEngine;

```

```

public class DiagramMaskTest : MonoBehaviour
{
    [Header("Input")]
    public Texture2D source;
    public Color targetColor = Color.red;

    [Range(0f, 1f)] public float tolerance = 0.12f;

    [Header("Output")]
    public Renderer previewRenderer;

    [ContextMenu("Generate Mask (RGB)")]
    public void GenerateRgb()
    {
        var mask = TextureDiagramExtractor.ExtractMaskRGB(source, targetColor, tolerance);
        if (previewRenderer != null)
        {
            previewRenderer.material = new Material(Shader.Find("Unlit/Texture"));
            previewRenderer.material.mainTexture = mask;
        }
    }
}
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class GraphVisualizer : MonoBehaviour
{
    [Header("Graph Settings")]
    [Tooltip("RawImage to draw the graph on")]
    public RawImage graphDisplay;

    [Tooltip("Width of the graph in pixels")]
    public int graphWidth = 512;

    [Tooltip("Height of the graph in pixels")]
    public int graphHeight = 512;

    [Header("Visual Settings")]
    [Tooltip("Background color of the graph")]
    public Color backgroundColor = Color.white;

    [Tooltip("Color of the grid lines")]
    public Color gridColor = new Color(0.8f, 0.8f, 0.8f);

    [Tooltip("Color of the data points")]
    public Color pointColor = Color.blue;

    [Tooltip("Color of the regression line")]
    public Color lineColor = Color.red;

    [Tooltip("Size of data points in pixels")]
    public int pointSize = 5;

    [Tooltip("Thickness of the regression line")]
    public int lineThickness = 2;

    [Tooltip("Number of grid lines")]
    public int gridLines = 5;

    private Texture2D graphTexture;

```

```

void Start()
{
    if (graphDisplay != null)
    {
        graphTexture = new Texture2D(graphWidth, graphHeight, TextureFormat.RGBA32,
false);
        graphTexture.filterMode = FilterMode.Bilinear;
        graphDisplay.texture = graphTexture;
    }
}

public void DrawGraph(List<float> xData, List<float> yData, float slope, float intercept)
{
    if (graphTexture == null || xData == null || yData == null || xData.Count == 0)
    {
        return;
    }

    ClearTexture();
    float minX = float.MaxValue, maxX = float.MinValue;
    float minY = float.MaxValue, maxY = float.MinValue;

    for (int i = 0; i < xData.Count; i++)
    {
        if (xData[i] < minX) minX = xData[i];
        if (xData[i] > maxX) maxX = xData[i];
        if (yData[i] < minY) minY = yData[i];
        if (yData[i] > maxY) maxY = yData[i];
    }

    float xRange = maxX - minX;
    float yRange = maxY - minY;
    minX -= xRange * 0.1f;
    maxX += xRange * 0.1f;
    minY -= yRange * 0.1f;
    maxY += yRange * 0.1f;

    DrawGrid(minX, maxX, minY, maxY);

    DrawRegressionLine(minX, maxX, minY, maxY, slope, intercept);

    DrawDataPoints(xData, yData, minX, maxX, minY, maxY);

    graphTexture.Apply();
}

private void ClearTexture()
{
    Color[] pixels = new Color[graphWidth * graphHeight];
    for (int i = 0; i < pixels.Length; i++)
    {
        pixels[i] = backgroundColor;
    }
    graphTexture.SetPixels(pixels);
}

private void DrawGrid(float minX, float maxX, float minY, float maxY)
{
    for (int i = 0; i <= gridLines; i++)
    {

```

```

        float t = i / (float)gridLines;
        int x = Mathf.RoundToInt(t * (graphWidth - 1));

        for (int y = 0; y < graphHeight; y++)
        {
            graphTexture.SetPixel(x, y, gridColor);
        }
    }

    for (int i = 0; i <= gridLines; i++)
    {
        float t = i / (float)gridLines;
        int y = Mathf.RoundToInt(t * (graphHeight - 1));

        for (int x = 0; x < graphWidth; x++)
        {
            graphTexture.SetPixel(x, y, gridColor);
        }
    }
}

private void DrawDataPoints(List<float> xData, List<float> yData, float minX, float maxX,
float minY, float maxY)
{
    for (int i = 0; i < xData.Count; i++)
    {
        int px = MapToPixelX(xData[i], minX, maxX);
        int py = MapToPixelY(yData[i], minY, maxY);

        DrawCircle(px, py, pointSize, pointColor);
    }
}

private void DrawRegressionLine(float minX, float maxX, float minY, float maxY, float
slope, float intercept)
{
    float y1 = slope * minX + intercept;
    float y2 = slope * maxX + intercept;

    int x1 = MapToPixelX(minX, minX, maxX);
    int y1Pixel = MapToPixelY(y1, minY, maxY);
    int x2 = MapToPixelX(maxX, minX, maxX);
    int y2Pixel = MapToPixelY(y2, minY, maxY);

    DrawLine(x1, y1Pixel, x2, y2Pixel, lineColor, lineThickness);
}

private int MapToPixelX(float value, float minVal, float maxVal)
{
    float normalized = (value - minVal) / (maxVal - minVal);
    return Mathf.Clamp(Mathf.RoundToInt(normalized * (graphWidth - 1)), 0, graphWidth -
1);
}

private int MapToPixelY(float value, float minVal, float maxVal)
{
    float normalized = (value - minVal) / (maxVal - minVal);
    return Mathf.Clamp(Mathf.RoundToInt(normalized * (graphHeight - 1)), 0, graphHeight -
1);
}

```

```

private void DrawCircle(int centerX, int centerY, int radius, Color color)
{
    for (int y = -radius; y <= radius; y++)
    {
        for (int x = -radius; x <= radius; x++)
        {
            if (x * x + y * y <= radius * radius)
            {
                int px = centerX + x;
                int py = centerY + y;

                if (px >= 0 && px < graphWidth && py >= 0 && py < graphHeight)
                {
                    graphTexture.SetPixel(px, py, color);
                }
            }
        }
    }
}

private void DrawLine(int x0, int y0, int x1, int y1, Color color, int thickness)
{
    int dx = Mathf.Abs(x1 - x0);
    int dy = Mathf.Abs(y1 - y0);
    int sx = x0 < x1 ? 1 : -1;
    int sy = y0 < y1 ? 1 : -1;
    int err = dx - dy;

    while (true)
    {
        DrawCircle(x0, y0, thickness / 2, color);

        if (x0 == x1 && y0 == y1) break;

        int e2 = 2 * err;
        if (e2 > -dy)
        {
            err -= dy;
            x0 += sx;
        }
        if (e2 < dx)
        {
            err += dx;
            y0 += sy;
        }
    }
}

public void ClearGraph()
{
    if (graphTexture != null)
    {
        ClearTexture();
        graphTexture.Apply();
    }
}
}

using SFB; // Standalone File Browser
using System;

```

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using System.IO;
using System.Linq;
using TMPro;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class ImageLoader : MonoBehaviour
{
    public enum MatchMode { RGB, HSV }

    [Header("UI Elements")]
    public RawImage displayArea;
    public RawImage processedDisplayArea1;
    public RawImage processedDisplayArea2;
    [Header("Target Color Sliders")]
    public Slider redSlider;
    public Slider greenSlider;
    public Slider blueSlider;
    public Image targetColorPreview;
    [Header("RGB Tolerance UI")]
    public Slider rgbToleranceSlider;
    [Header("Fractal Analysis UI")]
    public TMP_InputField iterationsInput;
    public TMP_InputField _minBoxSize;
    public TMP_InputField _maxBoxSize;
    [Header("Fractal Analysis Output")]
    public TMP_Text lineEquationText;
    public TMP_Text fractalDimensionText;
    public GraphVisualizer graphVisualizer;
    [Header("Processing Settings")]
    public MatchMode matchMode = MatchMode.RGB;

    [Tooltip("Якщо true - targetColor береться з центрального пікселя завантаженої
текстури.")]
    public bool useCenterPixelAsTarget = true;

    public Color targetColor = Color.red;

    [Range(0f, 1f)]

```

```

[Tooltip("RGB допуск (0..1). Типові значення 0.08..0.15")]
public float rgbTolerance = 0.12f;

[Range(0f, 1f)]
[Tooltip("HSV Hue допуск (0..1).")]
public float hsvHueTolerance = 0.03f;

[Range(0f, 1f)]
[Tooltip("HSV Saturation допуск (0..1).")]
public float hsvSatTolerance = 0.20f;

[Range(0f, 1f)]
[Tooltip("HSV Value допуск (0..1).")]
public float hsvValTolerance = 0.20f;

[Tooltip("Якщо true - збережемо альфу з оригіналу, якщо false - альфа буде 255.")]
public bool keepAlpha = false;
[Header("Fractal Analysis Settings")]
[Tooltip("Smallest box size in pixels")]
public int minBoxSize = 2;
[Tooltip("Largest box size in pixels")]
public int maxBoxSize = 128;
[Tooltip("How many different box sizes to test")]
public int iterations = 8;

private Texture2D _loadedTexture;
private List<float> xLogScale = new List<float>();
private List<float> yLogCount = new List<float>();
public void CalculateFractalDimension()
{
    if (iterations < 2)
    {
        return;
    }
    Texture2D mask = displayArea.texture as Texture2D;
    if (mask == null)
    {
        return;
    }

    xLogScale.Clear();

```

```

yLogCount.Clear();

for (int i = 0; i < iterations; i++)
{
    float t = (float)i / (iterations - 1);
    int bSize = Mathf.RoundToInt(Mathf.Lerp(minBoxSize, maxBoxSize, t));

    if (i > 0 && bSize <= Mathf.RoundToInt(Mathf.Lerp(minBoxSize, maxBoxSize,
(float)(i - 1) / (iterations - 1))))
        continue;

    int count = CountOccupiedBoxes(mask, bSize);

    if (count > 0)
    {
        xLogScale.Add(Mathf.Log((float)mask.width / bSize));
        yLogCount.Add(Mathf.Log(count));
    }
}

CalculateLinearRegression(xLogScale, yLogCount, out float slope, out float intercept);
float dimension = slope;
if (lineEquationText != null)
{
    lineEquationText.text =
$"log(N(ε)) = {slope:F3} · log(1/ε) + {intercept:F3}";
}
if (fractalDimensionText != null)
{
    fractalDimensionText.text = $"Fractal Dimension: {dimension:F4}";
}
if (graphVisualizer != null)
{
    graphVisualizer.DrawGraph(xLogScale, yLogCount, slope, intercept);
}
}

public void OnTargetColorSlidersChanged()
{
    targetColor = new Color(redSlider.value, greenSlider.value, blueSlider.value, 1f);

    useCenterPixelAsTarget = false;
}

```

```

    if (targetColorPreview != null)
    {
        targetColorPreview.color = targetColor;
    }
}
public void OnIterationsInputChanged(string value)
{
    if (int.TryParse(value, out int parsed))
    {
        iterations = Mathf.Clamp(parsed, 2, 50); // safe bounds
        iterationsInput.text = iterations.ToString();
    }
    else
    {
        iterationsInput.text = iterations.ToString();
    }
}
public void OnRgbToleranceChanged(float value)
{
    rgbTolerance = value;
}
void Start()
{
    if (redSlider != null) redSlider.onValueChanged.AddListener(delegate {
OnTargetColorSlidersChanged(); });
    if (greenSlider != null) greenSlider.onValueChanged.AddListener(delegate {
OnTargetColorSlidersChanged(); });
    if (blueSlider != null) blueSlider.onValueChanged.AddListener(delegate {
OnTargetColorSlidersChanged(); });

    UpdateSlidersFromColor();
    if (iterationsInput != null)
    {
        iterationsInput.text = iterations.ToString();
        iterationsInput.onEndEdit.AddListener(OnIterationsInputChanged);
    }
    if (_minBoxSize != null)
    {
        _minBoxSize.text = minBoxSize.ToString();
        _minBoxSize.onEndEdit.AddListener(OnMinBoxInputChanged);
    }
}

```

```

    }
    if (_maxBoxSize != null)
    {
        _maxBoxSize.text = maxBoxSize.ToString();
        _maxBoxSize.onEndEdit.AddListener(OnMaxBoxInputChanged);
    }
    if (rgbToleranceSlider != null)
    {
        rgbToleranceSlider.minValue = 0f;
        rgbToleranceSlider.maxValue = 1f;
        rgbToleranceSlider.value = rgbTolerance;
        rgbToleranceSlider.onValueChanged.AddListener(OnRgbToleranceChanged);
    }
}

private void OnMaxBoxInputChanged(string arg0)
{
    if (int.TryParse(arg0, out int parsed))
    {
        maxBoxSize = Mathf.Clamp(parsed, minBoxSize + 1, 1024);
        _maxBoxSize.text = maxBoxSize.ToString();
    }
    else
    {
        _maxBoxSize.text = maxBoxSize.ToString();
    }
}

private void OnMinBoxInputChanged(string arg0)
{
    if (int.TryParse(arg0, out int parsed))
    {
        minBoxSize = Mathf.Clamp(parsed, 2, maxBoxSize - 1);
        _minBoxSize.text = minBoxSize.ToString();
    }
    else
    {
        _minBoxSize.text = minBoxSize.ToString();
    }
}

private void UpdateSlidersFromColor()

```

```

{
    if (redSlider != null) redSlider.value = targetColor.r;
    if (greenSlider != null) greenSlider.value = targetColor.g;
    if (blueSlider != null) blueSlider.value = targetColor.b;
    if (targetColorPreview != null) targetColorPreview.color = targetColor;
}
private int CountOccupiedBoxes(Texture2D tex, int boxSize)
{
    int count = 0;
    Color32[] pixels = tex.GetPixels32();
    int w = tex.width;
    int h = tex.height;

    for (int y = 0; y < h; y += boxSize)
    {
        for (int x = 0; x < w; x += boxSize)
        {
            if (IsBoxOccupied(pixels, x, y, boxSize, w, h)) count++;
        }
    }
    return count;
}

private bool IsBoxOccupied(Color32[] pixels, int startX, int startY, int size, int texW,
int texH)
{
    for (int y = startY; y < startY + size && y < texH; y++)
    {
        for (int x = startX; x < startX + size && x < texW; x++)
        {
            if (pixels[y * texW + x].r < 128) return true;
        }
    }
    return false;
}

public void OnClickOpenFile()
{
    var extensions = new[] {
        new ExtensionFilter("Зображення", "png", "jpg", "jpeg"),
        new ExtensionFilter("Усі файли", "*" )
    }
}

```

```

};

string[] paths = StandaloneFileBrowser.OpenFilePanel("Виберіть зображення", "",
extensions, false);

if (paths.Length > 0 && !string.IsNullOrEmpty(paths[0]))
{
    StartCoroutine(LoadImageRoutine(paths[0]));
}
}

public void OnClickProcessToBlackWhite()
{
    if (_loadedTexture == null)
    {
        return;
    }

    Color t = targetColor;
    if (useCenterPixelAsTarget)
    {
        int cx = Mathf.Clamp(_loadedTexture.width / 2, 0, _loadedTexture.width - 1);
        int cy = Mathf.Clamp(_loadedTexture.height / 2, 0, _loadedTexture.height - 1);

        t = _loadedTexture.GetPixel(cx, cy);
        UpdateSlidersFromColor();
    }

    Texture2D bw;
    if (matchMode == MatchMode.RGB)
    {
        bw = TextureDiagramExtractor.ExtractMaskRGB(_loadedTexture, t, rgbTolerance,
keepAlpha);
    }
    else
    {
        bw = TextureDiagramExtractor.ExtractMaskHSV(_loadedTexture, t, hsvHueTolerance,
hsvSatTolerance, hsvValTolerance, keepAlpha);
    }

    if (processedDisplayArea1 != null)

```

```

    {
        processedDisplayArea1.texture = bw;
        processedDisplayArea1.SetNativeSize();
    }

    if (processedDisplayArea2 != null)
    {
        processedDisplayArea2.texture = bw;
        processedDisplayArea2.SetNativeSize();
    }
}

private IEnumerator LoadImageRoutine(string path)
{
    string url = "file:/// " + path;

    byte[] fileData = File.ReadAllBytes(path);

    Texture2D texture = new Texture2D(2, 2, TextureFormat.RGBA32, false);

    if (texture.LoadImage(fileData))
    {
        _loadedTexture = texture;

        displayArea.texture = _loadedTexture;
        if (processedDisplayArea1 != null)
        {
            processedDisplayArea1.texture = null;
        }
        if (processedDisplayArea2 != null)
        {
            processedDisplayArea2.texture = null;
        }
        displayArea.SetNativeSize();
        if (useCenterPixelAsTarget)
        {
            targetColor = _loadedTexture.GetPixel(_loadedTexture.width / 2,
            _loadedTexture.height / 2);
            UpdateSlidersFromColor();
        }
    }
}

```

```

        yield return null;
    }
    private void CalculateLinearRegression(
    List<float> x,
    List<float> y,
    out float slope,
    out float intercept)
    {
        slope = 0;
        intercept = 0;

        if (x.Count < 2) return;

        int n = x.Count;
        float sumX = x.Sum();
        float sumY = y.Sum();
        float sumXY = x.Zip(y, (a, b) => a * b).Sum();
        float sumX2 = x.Select(a => a * a).Sum();

        slope = (n * sumXY - sumX * sumY) / (n * sumX2 - sumX * sumX);
        intercept = (sumY - slope * sumX) / n;
    }
    private static class TextureDiagramExtractor
    {
        public static Texture2D ExtractMaskRGB(Texture2D source, Color targetColor, float
tolerance, bool keepAlpha)
        {
            if (source == null) throw new System.ArgumentNullException(nameof(source));
            if (!source.isReadable)
                throw new System.InvalidOperationException(
                    $"Texture '{source.name}' is not readable. (For imported textures enable
Read/Write, for runtime-loaded it should be readable)");

            tolerance = Mathf.Clamp01(tolerance);

            int w = source.width;
            int h = source.height;

            Color32[] src = source.GetPixels32();
            Color32[] dst = new Color32[src.Length];

```

```

Vector3 t = new Vector3(targetColor.r, targetColor.g, targetColor.b);
float tol2 = tolerance * tolerance;

for (int i = 0; i < src.Length; i++)
{
    Color32 c32 = src[i];
    float r = c32.r / 255f;
    float g = c32.g / 255f;
    float b = c32.b / 255f;

    float dr = r - t.x;
    float dg = g - t.y;
    float db = b - t.z;

    float dist2 = dr * dr + dg * dg + db * db;

    bool isMatch = dist2 <= tol2;

    byte a = keepAlpha ? c32.a : (byte)255;
    dst[i] = isMatch ? new Color32(0, 0, 0, a) : new Color32(255, 255, 255, a);
}

var outTex = new Texture2D(w, h, TextureFormat.RGBA32, false, false);
outTex.SetPixels32(dst);
outTex.Apply(false, false);
return outTex;
}

public static Texture2D ExtractMaskHSV(Texture2D source, Color targetColor,
    float hueTolerance, float satTolerance, float valTolerance, bool keepAlpha)
{
    if (source == null) throw new System.ArgumentNullException(nameof(source));
    if (!source.isReadable)
        throw new System.InvalidOperationException(
            $"Texture '{source.name}' is not readable. (For imported textures enable
Read/Write, for runtime-loaded it should be readable)");

    hueTolerance = Mathf.Clamp01(hueTolerance);
    satTolerance = Mathf.Clamp01(satTolerance);
    valTolerance = Mathf.Clamp01(valTolerance);

```

```

int w = source.width;
int h = source.height;

Color32[] src = source.GetPixels32();
Color32[] dst = new Color32[src.Length];

Color.RGBToHSV(targetColor, out float th, out float ts, out float tv);

for (int i = 0; i < src.Length; i++)
{
    Color32 c32 = src[i];
    Color c = new Color(c32.r / 255f, c32.g / 255f, c32.b / 255f, c32.a / 255f);

    Color.RGBToHSV(c, out float h1, out float s1, out float v1);

    float dh = Mathf.Abs(h1 - th);
    dh = Mathf.Min(dh, 1f - dh);

    bool isMatch =
        dh <= hueTolerance &&
        Mathf.Abs(s1 - ts) <= satTolerance &&
        Mathf.Abs(v1 - tv) <= valTolerance;

    byte a = keepAlpha ? c32.a : (byte)255;
    dst[i] = isMatch ? new Color32(0, 0, 0, a) : new Color32(255, 255, 255, a);
}

var outTex = new Texture2D(w, h, TextureFormat.RGBA32, false, false);
outTex.SetPixels32(dst);
outTex.Apply(false, false);
return outTex;
}
}
}
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class ObjectToggle : MonoBehaviour
{
    [SerializeField] private GameObject objectToDisable;
    [SerializeField] private GameObject objectToEnable;
    [SerializeField] private Button toggleButton;
}

```

```

private void Start()
{
    if (toggleButton != null)
    {
        toggleButton.onClick.AddListener(ToggleObjects);
    }
}

private void ToggleObjects()
{
    if (objectToDisable != null)
    {
        objectToDisable.SetActive(false);
    }

    if (objectToEnable != null)
    {
        objectToEnable.SetActive(true);
    }
}

private void OnDestroy()
{
    if (toggleButton != null)
    {
        toggleButton.onClick.RemoveListener(ToggleObjects);
    }
}
}

using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;
using UnityEngine.EventSystems;
using System;

public class PipetteColorPicker : MonoBehaviour, IPointerClickHandler
{
    [Header("Target Image")]
    [Tooltip("The RawImage or Image to pick colors from")]
    public RawImage targetRawImage;
    public Image targetImage;

    [Header("Output")]
    [Tooltip("Image to preview the picked color")]
    public Image colorPreview;

    [Tooltip("Optional: Button to toggle pipette mode")]
    public Button pipetteButton;

    [Header("Visual Feedback")]
    [Tooltip("Cursor texture when in pipette mode")]
    public Texture2D pipetteCursor;

    [Tooltip("Show magnified preview while picking")]
    public bool showMagnifier = true;

    [Tooltip("Magnifier RawImage (optional)")]
    public RawImage magnifierDisplay;

    [Tooltip("Magnification level")]

```

```

public int magnification = 5;

[Header("Settings")]
[Tooltip("Enable pipette mode on start")]
public bool pipetteModeOnStart = false;

// Events
public event Action<Color> OnColorPicked;

private bool _isPipetteMode = false;
private Texture2D _workingTexture;
private RectTransform _imageRectTransform;
private Texture2D _magnifierTexture;

void Start()
{
    if (pipetteButton != null)
    {
        pipetteButton.onClick.AddListener(TogglePipetteMode);
    }

    if (pipetteModeOnStart)
    {
        EnablePipetteMode();
    }

    if (targetRawImage != null)
    {
        _imageRectTransform = targetRawImage.GetComponent<RectTransform>();
    }
    else if (targetImage != null)
    {
        _imageRectTransform = targetImage.GetComponent<RectTransform>();
    }

    if (showMagnifier && magnifierDisplay != null)
    {
        int magSize = 64;
        _magnifierTexture = new Texture2D(magSize, magSize, TextureFormat.RGBA32, false);
        _magnifierTexture.filterMode = FilterMode.Point; // Pixelated look
        magnifierDisplay.texture = _magnifierTexture;
        magnifierDisplay.gameObject.SetActive(false);
    }
}

void Update()
{
    if (_isPipetteMode)
    {
        if (showMagnifier && magnifierDisplay != null && _magnifierTexture != null)
        {
            UpdateMagnifier();
        }
    }
}

public void TogglePipetteMode()
{
    if (_isPipetteMode)
    {
        DisablePipetteMode();
    }
}

```

```

    }
    else
    {
        EnablePipetteMode();
    }
}

public void EnablePipetteMode()
{
    _isPipetteMode = true;

    if (pipetteCursor != null)
    {
        Cursor.SetCursor(pipetteCursor, new Vector2(0, pipetteCursor.height),
CursorMode.Auto);
    }

    if (magnifierDisplay != null)
    {
        magnifierDisplay.gameObject.SetActive(true);
    }
}

public void DisablePipetteMode()
{
    _isPipetteMode = false;

    Cursor.SetCursor(null, Vector2.zero, CursorMode.Auto);

    if (magnifierDisplay != null)
    {
        magnifierDisplay.gameObject.SetActive(false);
    }
}

public void OnPointerClick(PointerEventData eventData)
{
    if (!_isPipetteMode) return;

    Color pickedColor = GetColorAtPointer(eventData);

    if (pickedColor.a > 0)
    {
        ApplyPickedColor(pickedColor);
    }
}

private Color GetColorAtPointer(PointerEventData eventData)
{
    if (_imageRectTransform == null) return Color.clear;

    Vector2 localPoint;
    RectTransformUtility.ScreenPointToLocalPointInRectangle(
        _imageRectTransform,
        eventData.position,
        eventData.pressEventCamera,
        out localPoint);

    Texture2D sourceTexture = GetSourceTexture();
    if (sourceTexture == null) return Color.clear;
}

```

```

Rect rect = _imageRectTransform.rect;
float normalizedX = (localPoint.x - rect.x) / rect.width;
float normalizedY = (localPoint.y - rect.y) / rect.height;

normalizedX = Mathf.Clamp01(normalizedX);
normalizedY = Mathf.Clamp01(normalizedY);

int pixelX = Mathf.FloorToInt(normalizedX * sourceTexture.width);
int pixelY = Mathf.FloorToInt(normalizedY * sourceTexture.height);

pixelX = Mathf.Clamp(pixelX, 0, sourceTexture.width - 1);
pixelY = Mathf.Clamp(pixelY, 0, sourceTexture.height - 1);

return sourceTexture.GetPixel(pixelX, pixelY);
}

private void UpdateMagnifier()
{
    if (_imageRectTransform == null || _magnifierTexture == null) return;

    Vector2 mousePos = Input.mousePosition;
    RectTransform magRect = magnifierDisplay.GetComponent<RectTransform>();
    magRect.position = mousePos + new Vector2(30, 30);

    Texture2D sourceTexture = GetSourceTexture();
    if (sourceTexture == null) return;

    Vector2 localPoint;
    if (!RectTransformUtility.ScreenPointToLocalPointInRectangle(
        _imageRectTransform, mousePos, null, out localPoint))
        return;

    Rect rect = _imageRectTransform.rect;
    float normalizedX = (localPoint.x - rect.x) / rect.width;
    float normalizedY = (localPoint.y - rect.y) / rect.height;

    int centerX = Mathf.FloorToInt(normalizedX * sourceTexture.width);
    int centerY = Mathf.FloorToInt(normalizedY * sourceTexture.height);

    int halfSize = _magnifierTexture.width / 2;
    for (int y = 0; y < _magnifierTexture.height; y++)
    {
        for (int x = 0; x < _magnifierTexture.width; x++)
        {
            int sourceX = centerX + (x - halfSize) / magnification;
            int sourceY = centerY + (y - halfSize) / magnification;

            if (sourceX >= 0 && sourceX < sourceTexture.width &&
                sourceY >= 0 && sourceY < sourceTexture.height)
            {
                Color color = sourceTexture.GetPixel(sourceX, sourceY);
                _magnifierTexture.SetPixel(x, y, color);
            }
            else
            {
                _magnifierTexture.SetPixel(x, y, Color.black);
            }
        }
    }

    _magnifierTexture.Apply();
}

```

```

    }

    private Texture2D GetSourceTexture()
    {
        if (targetRawImage != null && targetRawImage.texture is Texture2D)
        {
            return targetRawImage.texture as Texture2D;
        }
        else if (targetImage != null && targetImage.sprite != null)
        {
            return SpriteToTexture2D(targetImage.sprite);
        }
        return null;
    }

    private Texture2D SpriteToTexture2D(Sprite sprite)
    {
        if (sprite.rect.width != sprite.texture.width)
        {
            Texture2D newTexture = new Texture2D((int)sprite.rect.width,
(int)sprite.rect.height);
            Color[] pixels = sprite.texture.GetPixels(
                (int)sprite.rect.x,
                (int)sprite.rect.y,
                (int)sprite.rect.width,
                (int)sprite.rect.height);
            newTexture.SetPixels(pixels);
            newTexture.Apply();
            return newTexture;
        }
        else
        {
            return sprite.texture;
        }
    }

    private void ApplyPickedColor(Color color)
    {
        if (colorPreview != null)
        {
            colorPreview.color = color;
        }

        OnColorPicked?.Invoke(color);
    }

    private void OnDestroy()
    {
        if (pipetteButton != null)
        {
            pipetteButton.onClick.RemoveListener(TogglePipetteMode);
        }

        if (_magnifierTexture != null)
        {
            Destroy(_magnifierTexture);
        }
    }
}

using System;

```

```

using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using TMPro;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class ResistanceEstimator : MonoBehaviour
{
    [System.Serializable]
    public class EtalonConstants
    {
        public float trackWidth;
        public float Rse;
        public float P1e;
        public float P2e;
        public float Rm1e;
        public float Rm2e;
        public float Rt1e;
        public float Rt2mine;
        public float Rt2maxe;
    }

    [System.Serializable]
    public class TestBlock
    {
        [Header("Input Fields")]
        public TMP_InputField rsInput;
        public TMP_InputField rm1Input;
        public TMP_InputField rm2Input;
        public TMP_InputField rt1Input;
        public TMP_InputField rt2Input;
        public TMP_InputField p1Input;
        public TMP_InputField p2Input;
        public TMP_InputField widthInput;

        [Header("Output")]
        public TMP_Text resultText;

        [HideInInspector]
        public bool isValid = true;
    }

    [Header("Calculation Button")]
    public Button calculateButton;
    public Button clearButton;
    [Header("Test Blocks")]
    [Tooltip("Add all test blocks that need to be calculated")]
    public List<TestBlock> testBlocks = new List<TestBlock>();

    [Header("Etalon Constants")]
    [Tooltip("Etalon constant sets for widths: 1, 2, 3, 4, 5 mm")]
    public List<EtalonConstants> etalonSets = new List<EtalonConstants>();
    public void ClearAllBlocks()
    {
        int clearedCount = 0;

        foreach (var block in testBlocks)
        {
            if (block == null) continue;

            if (!IsBlockActive(block)) continue;
        }
    }
}

```

```

        ClearBlock(block);
        clearedCount++;
    }
}
private void Start()
{
    if (calculateButton != null)
    {
        calculateButton.onClick.AddListener(CalculateAllBlocks);
    }

    if (clearButton != null)
    {
        clearButton.onClick.AddListener(ClearAllBlocks);
    }
    if (etalonSets.Count == 0)
    {
        InitializeDefaultEtalons();
    }
}
private void ClearBlock(TestBlock block)
{
    if (block.rsInput != null) block.rsInput.text = "";
    if (block.rm1Input != null) block.rm1Input.text = "";
    if (block.rm2Input != null) block.rm2Input.text = "";
    if (block.rt1Input != null) block.rt1Input.text = "";
    if (block.rt2Input != null) block.rt2Input.text = "";
    if (block.p1Input != null) block.p1Input.text = "";
    if (block.p2Input != null) block.p2Input.text = "";
    if (block.widthInput != null) block.widthInput.text = "";

    if (block.resultText != null) block.resultText.text = "";

    block.isValid = true;
}
private void InitializeDefaultEtalons()
{
    etalonSets.Add(new EtalonConstants
    {
        trackWidth = 1f,
        Rse = 1035.583333f,
        P1e = 0.13f,
        P2e = 0.07f,
        Rm1e = 780.7f,
        Rm2e = 831.7f,
        Rt1e = 577.3f,
        Rt2mine = 555f,
        Rt2maxe = 723f
    });

    etalonSets.Add(new EtalonConstants
    {
        trackWidth = 2f,
        Rse = 425.0833333f,
        P1e = 0.13f,
        P2e = 0.07f,
        Rm1e = 324.3f,
        Rm2e = 348.3f,
        Rt1e = 262.6f,
        Rt2mine = 231.6f,
    });
}

```

```

        Rt2maxe = 319.3f
    });

    etalonSets.Add(new EtalonConstants
    {
        trackWidth = 3f,
        Rse = 267.5f,
        P1e = 0.13f,
        P2e = 0.07f,
        Rm1e = 184f,
        Rm2e = 226f,
        Rt1e = 152.6f,
        Rt2mine = 141.6f,
        Rt2maxe = 192.3f
    });

    etalonSets.Add(new EtalonConstants
    {
        trackWidth = 4f,
        Rse = 201.1f,
        P1e = 0.13f,
        P2e = 0.07f,
        Rm1e = 130.7f,
        Rm2e = 150.3f,
        Rt1e = 110.3f,
        Rt2mine = 100f,
        Rt2maxe = 130f
    });

    etalonSets.Add(new EtalonConstants
    {
        trackWidth = 5f,
        Rse = 161.1f,
        P1e = 0.13f,
        P2e = 0.07f,
        Rm1e = 96f,
        Rm2e = 108.3f,
        Rt1e = 79.3f,
        Rt2mine = 76.3f,
        Rt2maxe = 113f
    });
}

public void CalculateAllBlocks()
{
    int successCount = 0;
    int errorCount = 0;

    foreach (var block in testBlocks)
    {
        if (block == null) continue;

        if (!IsBlockActive(block)) continue;

        bool success = CalculateBlockComplexFactor(block);
        if (success)
            successCount++;
        else
            errorCount++;
    }
}

```

```

private bool IsBlockActive(TestBlock block)
{
    if (block.rsInput != null && block.rsInput.gameObject.activeInHierarchy)
        return true;

    return false;
}

private bool CalculateBlockComplexFactor(TestBlock block)
{
    if (!TryParseBlockInputs(block, out float Rs, out float Rm1, out float Rm2,
        out float Rt1, out float Rt2, out float P1, out float P2, out float width))
    {
        ShowBlockError(block, "Invalid input values");
        return false;
    }

    EtalonConstants etalon = FindClosestEtalon(width);

    if (etalon == null)
    {
        ShowBlockError(block, "No etalon constants available");
        return false;
    }

    List<float> factors = new List<float>();

    try
    {
        factors.Add(etalon.Rse / Rs);

        factors.Add(1f - ((Rm1 - Rs) / (etalon.Rm1e - etalon.Rse)));

        factors.Add(1f - ((Rm2 - Rs) / (etalon.Rm2e - etalon.Rse)));

        factors.Add((Rt1 - Rs) / (etalon.Rt1e - etalon.Rse));

        float numerator = (Rt2 - Rs) - (etalon.Rt2mine - etalon.Rse);
        float denominator = (etalon.Rt2maxe - etalon.Rse) - (etalon.Rt2mine - etalon.Rse);
        factors.Add(numerator / denominator);

        factors.Add(etalon.P1e / P1);

        factors.Add(etalon.P2e / P2);

        factors.Add(etalon.Rm1e / Rm1);

        factors.Add(etalon.Rm2e / Rm2);

        factors.Add(etalon.Rt1e / Rt1);

        factors.Add(etalon.Rt2mine / Rt2);

        float complexFactor = factors.Average();

        if (block.resultText != null)
        {
            block.resultText.text = $"{{complexFactor:F4}}";
        }
    }
}

```

```

        block.isValid = true;
        return true;
    }
    catch (DivideByZeroException)
    {
        ShowBlockError(block, "Division by zero");
        return false;
    }
    catch (Exception ex)
    {
        ShowBlockError(block, $"Error: {ex.Message}");
        return false;
    }
}

private EtalonConstants FindClosestEtalon(float width)
{
    if (etalonSets.Count == 0) return null;

    return etalonSets.OrderBy(e => Mathf.Abs(e.trackWidth - width)).First();
}

private bool TryParseBlockInputs(TestBlock block, out float Rs, out float Rm1, out float
Rm2,
    out float Rt1, out float Rt2, out float P1, out float P2, out float width)
{
    Rs = Rm1 = Rm2 = Rt1 = Rt2 = P1 = P2 = width = 0f;

    return float.TryParse(block.rsInput?.text, out Rs) &&
        float.TryParse(block.rm1Input?.text, out Rm1) &&
        float.TryParse(block.rm2Input?.text, out Rm2) &&
        float.TryParse(block.rt1Input?.text, out Rt1) &&
        float.TryParse(block.rt2Input?.text, out Rt2) &&
        float.TryParse(block.p1Input?.text, out P1) &&
        float.TryParse(block.p2Input?.text, out P2) &&
        float.TryParse(block.widthInput?.text, out width) &&
        P1 != 0 && P2 != 0 &&
        Rs != 0 && Rm1 != 0 && Rm2 != 0 && Rt1 != 0 && Rt2 != 0;
}

private void ShowBlockError(TestBlock block, string message)
{
    if (block.resultText != null)
    {
        block.resultText.text = $"<color=red>Error: {message}</color>";
    }
    block.isValid = false;
}

private void OnDestroy()
{
    if (calculateButton != null)
    {
        calculateButton.onClick.RemoveListener(CalculateAllBlocks);
    }
}

public void AddTestBlock(TestBlock newBlock)
{
    if (newBlock != null && !testBlocks.Contains(newBlock))
    {

```

```

        testBlocks.Add(newBlock);
    }
}

public void RemoveTestBlock(TestBlock blockToRemove)
{
    if (blockToRemove != null && testBlocks.Contains(blockToRemove))
    {
        testBlocks.Remove(blockToRemove);
    }
}

}

using TMPPro;
using UnityEngine;

public class TestBlockComponent : MonoBehaviour
{
    [Header("Input Fields")]
    [SerializeField] private TMP_InputField rsInput;
    [SerializeField] private TMP_InputField rm1Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField rm2Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField rt1Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField rt2Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField p1Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField p2Input;
    [SerializeField] private TMP_InputField widthInput;

    [Header("Output")]
    [SerializeField] private TMP_Text resultText;
    private ResistanceEstimator.TestBlock _testBlock;

    public ResistanceEstimator.TestBlock TestBlock
    {
        get
        {
            if (_testBlock == null)
            {
                InitializeTestBlock();
            }
            return _testBlock;
        }
    }

    private void Awake()
    {
        InitializeTestBlock();
    }

    private void InitializeTestBlock()
    {
        _testBlock = new ResistanceEstimator.TestBlock
        {
            rsInput = rsInput,
            rm1Input = rm1Input,
            rm2Input = rm2Input,
            rt1Input = rt1Input,
            rt2Input = rt2Input,
            p1Input = p1Input,
            p2Input = p2Input,
            widthInput = widthInput,

```

```

        resultText = resultText
    };
}

public void SetDefaultValues(float rs, float rm1, float rm2, float rt1, float rt2,
                             float p1, float p2, float width)
{
    if (rsInput != null) rsInput.text = rs.ToString();
    if (rm1Input != null) rm1Input.text = rm1.ToString();
    if (rm2Input != null) rm2Input.text = rm2.ToString();
    if (rt1Input != null) rt1Input.text = rt1.ToString();
    if (rt2Input != null) rt2Input.text = rt2.ToString();
    if (p1Input != null) p1Input.text = p1.ToString();
    if (p2Input != null) p2Input.text = p2.ToString();
    if (widthInput != null) widthInput.text = width.ToString();
}

public void ClearInputs()
{
    if (rsInput != null) rsInput.text = "";
    if (rm1Input != null) rm1Input.text = "";
    if (rm2Input != null) rm2Input.text = "";
    if (rt1Input != null) rt1Input.text = "";
    if (rt2Input != null) rt2Input.text = "";
    if (p1Input != null) p1Input.text = "";
    if (p2Input != null) p2Input.text = "";
    if (widthInput != null) widthInput.text = "";
    if (resultText != null) resultText.text = "";
}
}

using UnityEngine;

public static class TextureDiagramExtractor
{
    public static Texture2D ExtractMaskRGB(Texture2D source, Color targetColor, float
tolerance, bool keepAlpha = false)
    {
        if (source == null) throw new System.ArgumentNullException(nameof(source));
        if (!source.isReadable)
            throw new System.InvalidOperationException(
                $"Texture '{source.name}' is not readable. Enable Read/Write in import
settings.");

        tolerance = Mathf.Clamp01(tolerance);

        int w = source.width;
        int h = source.height;

        Color32[] src = source.GetPixels32();
        Color32[] dst = new Color32[src.Length];

        Vector3 t = new Vector3(targetColor.r, targetColor.g, targetColor.b);
        float tol2 = tolerance * tolerance;

        for (int i = 0; i < src.Length; i++)
        {
            Color32 c32 = src[i];
            float r = c32.r / 255f;
            float g = c32.g / 255f;

```

```

float b = c32.b / 255f;

float dr = r - t.x;
float dg = g - t.y;
float db = b - t.z;

float dist2 = dr * dr + dg * dg + db * db;

bool isMatch = dist2 <= tol2;

byte a = keepAlpha ? c32.a : (byte)255;
dst[i] = isMatch
    ? new Color32(0, 0, 0, a)
    : new Color32(255, 255, 255, a);
}

var outTex = new Texture2D(w, h, TextureFormat.RGBA32, false, false);
outTex.SetPixels32(dst);
outTex.Apply(false, false);
return outTex;
}

public static Texture2D ExtractMaskHSV(Texture2D source, Color targetColor,
float hueTolerance, float satTolerance, float valTolerance, bool keepAlpha = false)
{
    if (source == null) throw new System.ArgumentNullException(nameof(source));
    if (!source.isReadable)
        throw new System.InvalidOperationException(
            $"Texture '{source.name}' is not readable. Enable Read/Write in import
settings.");

    hueTolerance = Mathf.Clamp01(hueTolerance);
    satTolerance = Mathf.Clamp01(satTolerance);
    valTolerance = Mathf.Clamp01(valTolerance);

    int w = source.width;
    int h = source.height;

    Color32[] src = source.GetPixels32();
    Color32[] dst = new Color32[src.Length];

    Color.RGBToHSV(targetColor, out float th, out float ts, out float tv);

    for (int i = 0; i < src.Length; i++)
    {
        Color32 c32 = src[i];
        Color c = new Color(c32.r / 255f, c32.g / 255f, c32.b / 255f, c32.a / 255f);

        Color.RGBToHSV(c, out float h1, out float s1, out float v1);

        float dh = Mathf.Abs(h1 - th);
        dh = Mathf.Min(dh, 1f - dh);

        bool isMatch =
            dh <= hueTolerance &&
            Mathf.Abs(s1 - ts) <= satTolerance &&
            Mathf.Abs(v1 - tv) <= valTolerance;

        byte a = keepAlpha ? c32.a : (byte)255;
        dst[i] = isMatch ? new Color32(0, 0, 0, a) : new Color32(255, 255, 255, a);
    }
}

```

```
var outTex = new Texture2D(w, h, TextureFormat.RGBA32, false, false);  
outTex.SetPixels32(dst);  
outTex.Apply(false, false);  
return outTex;  
}  
}
```

ДОДАТОК Е ТОПОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ ОСНОВ

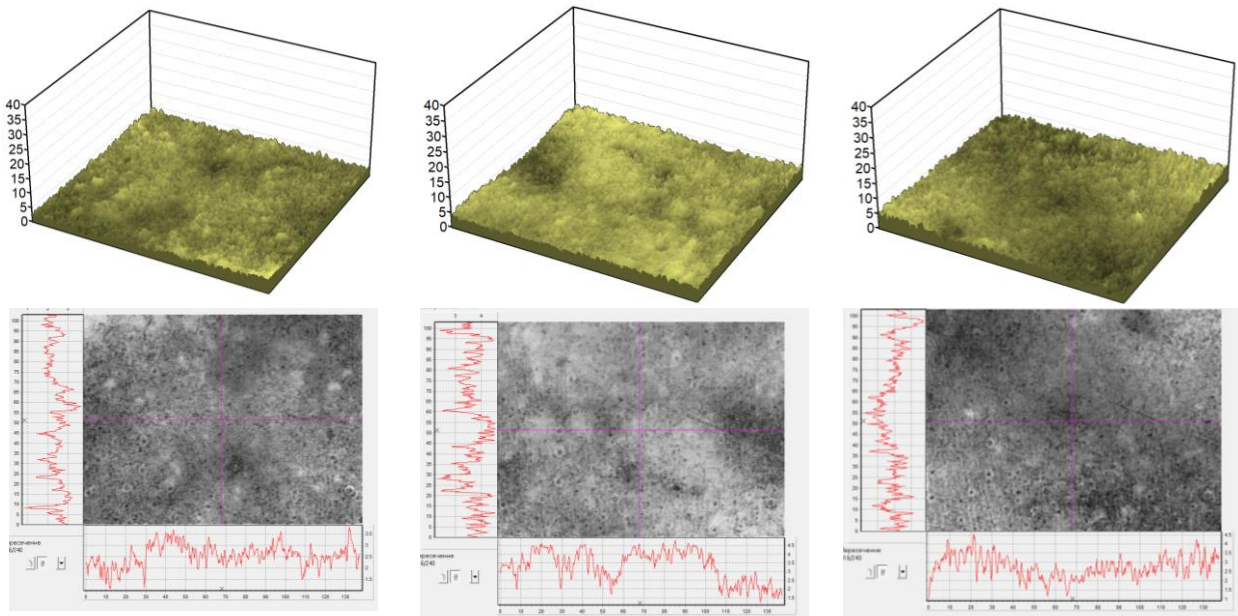


Рис. Е.1. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи М0

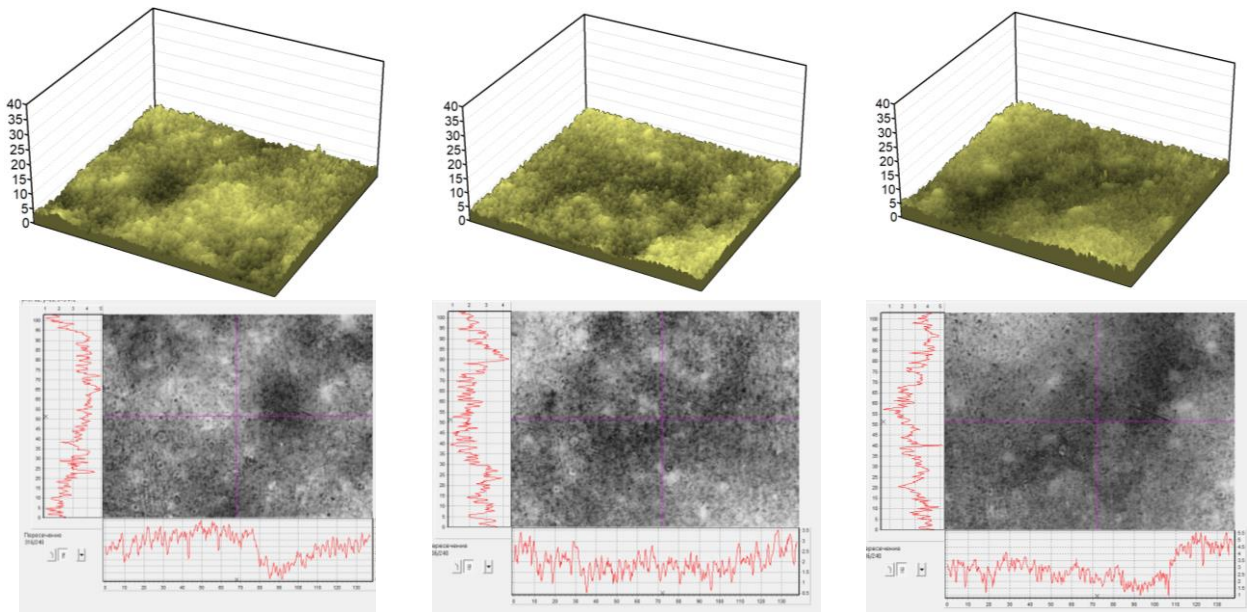


Рис. Е.2. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи М1000

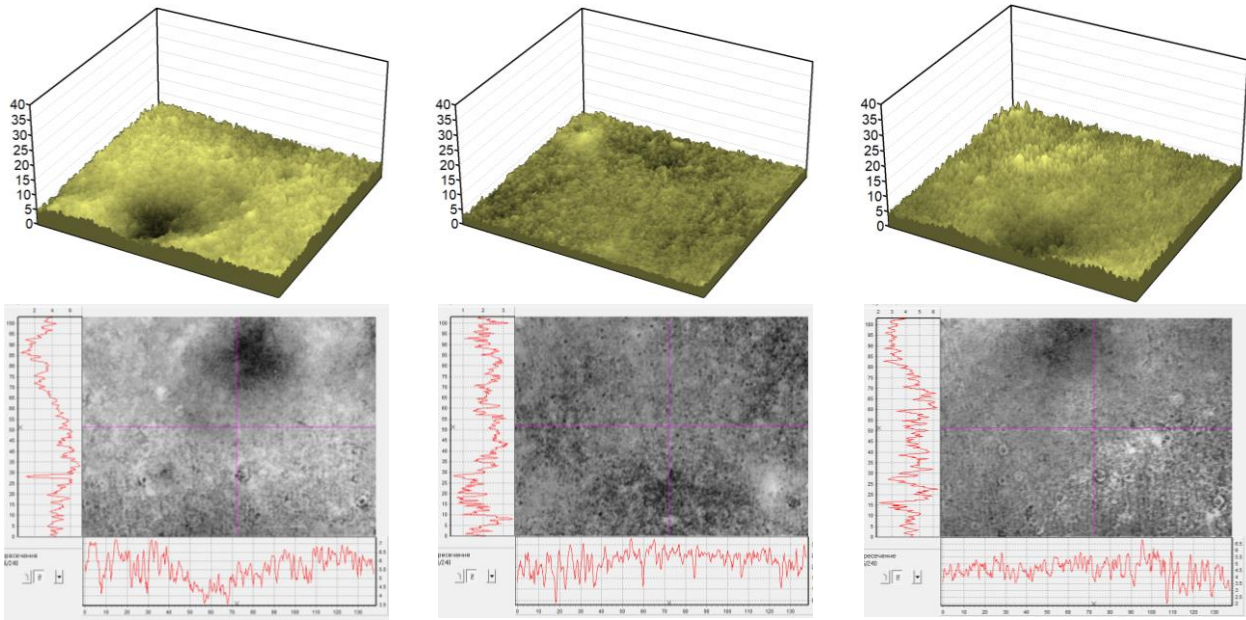


Рис. Е.3. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи М3000

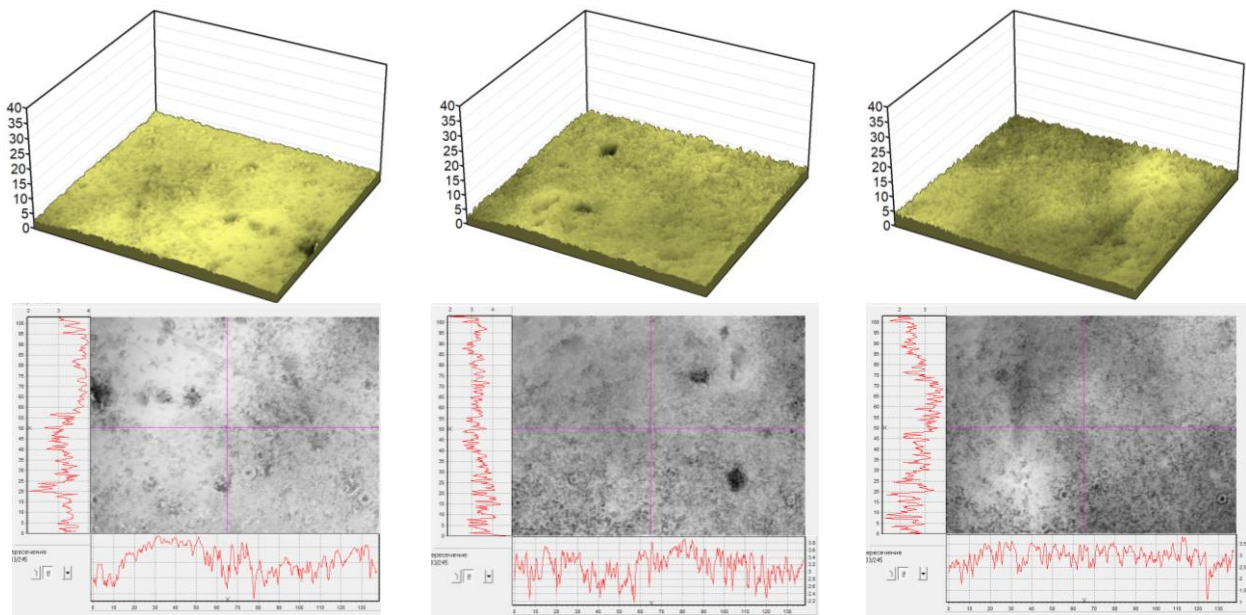


Рис. Е.4. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи Г0

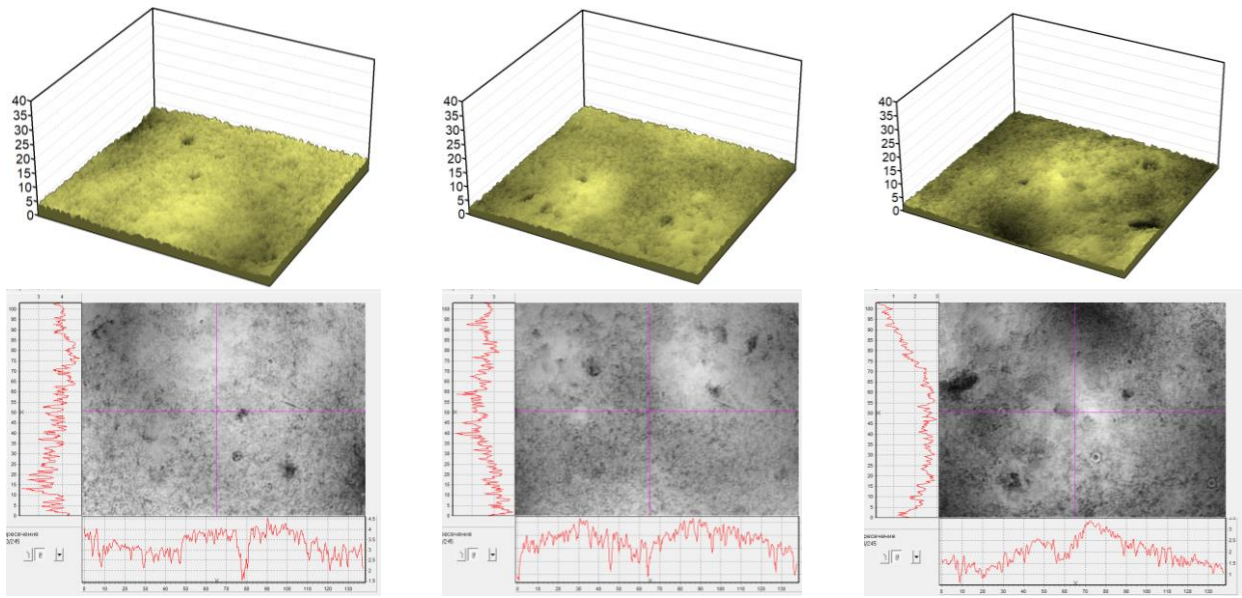


Рис. Е.5. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи Г1000

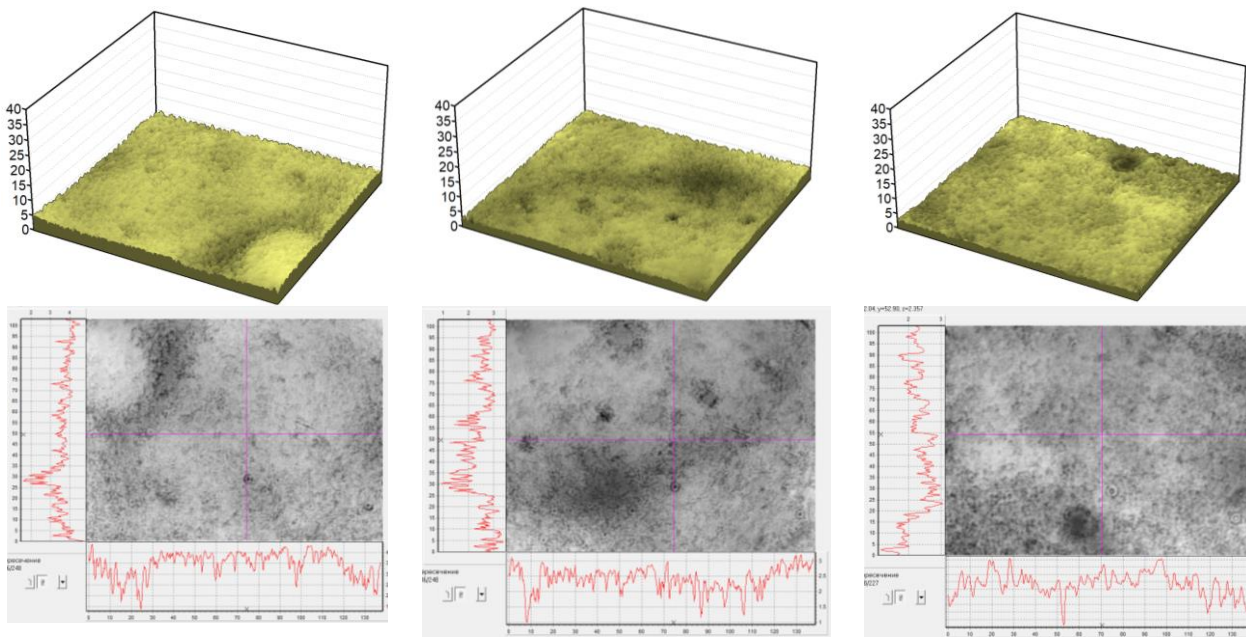


Рис. Е.6. Тривимірні і двовимірні топографії поверхонь зразків групи Г3000

ДОДАТОК Ж РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ОПОРУ ПІСЛЯ ТЕРМОЦИКЛІВ

Таблиця Ж.1. Середні значення опору доріжок нанесених магнетронним напиленням після термоциклювання

Група зразків – Алюміній без підшару						
Ширина контактної доріжки, мм		1	2	3	4	5
М0	Середнє значення, Ом	44,70	17,63	7,33	5,60	5,63
М1000	Середнє значення, Ом	93,26	12,86	7,70	5,43	4,50
М3000	Середнє значення, Ом	-	-	70,60	65,90	44,40
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	50,80	24,26	14,13	16,63	23,83
Г3000	Середнє значення, Ом	-	-	30,80	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром титану						
М0	Середнє значення, Ом	45,80	16,06	23,30	25,43	17,60
М1000	Середнє значення, Ом	86,83	33,63	-	36,66	18,80
М3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром хрому						
М0	Середнє значення, Ом	-	-	47,60	57,46	43,60
М1000	Середнє значення, Ом	33,53	18,53	12,40	11,00	11,56
М3000	Середнє значення, Ом	15,76	7,80	5,20	3,86	5,20
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	25,86	-	-	-	-

Таблиця Ж.2. Середні значення опору доріжок нанесених магнетронним напиленням після другого термоциклювання

Група зразків – Алюміній без підшару						
Ширина контактної доріжки, мм		1	2	3	4	5
М0	Середнє значення, Ом	60,50	19,06	10,86	9,56	15,36
М1000	Середнє значення, Ом	-	15,70	7,80	7,10	6,00
М3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	54,70	32,80	34,20	61,90
Г3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром титану						
М0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
М1000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	82,40
М3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Група зразків – Алюміній з підшаром хрому						
М0	Середнє значення, Ом	-	-	75,76	-	-
М1000	Середнє значення, Ом	53,40	65,53	56,70	53,40	27,43
М3000	Середнє значення, Ом	30,50	19,80	10,73	9,36	16,56
Г0	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г1000	Середнє значення, Ом	-	-	-	-	-
Г3000	Середнє значення, Ом	30,10	-	-	-	-

ДОДАТОК К МІКРОФОТОГРАФІЇ ПОВЕРХНІ НАНЕСЕНОГО МАТЕРІАЛУ

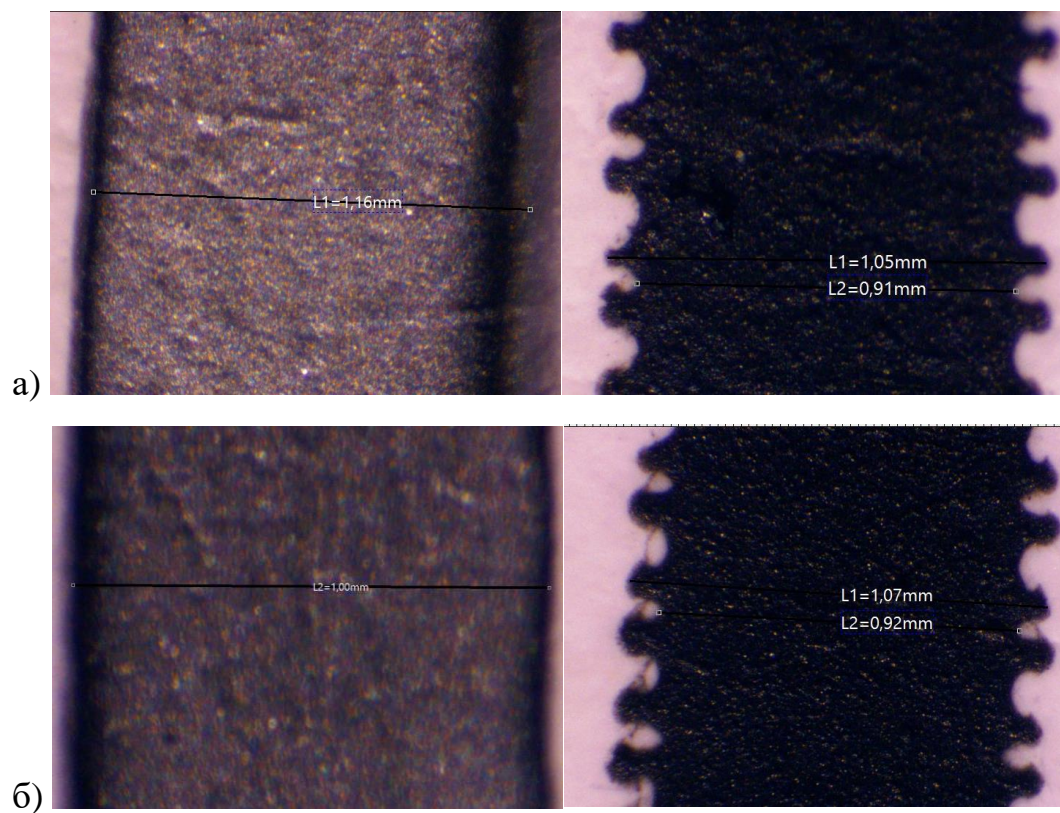
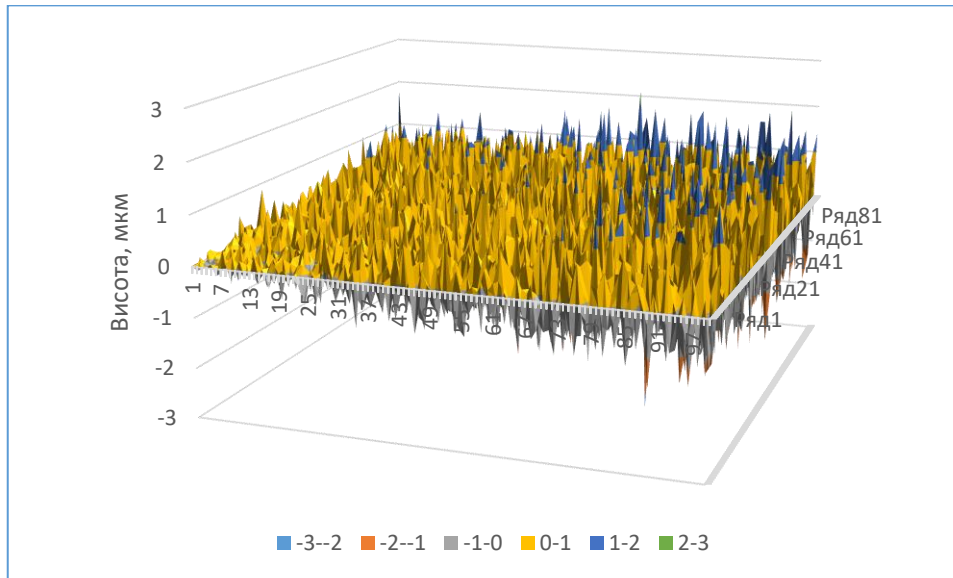


Рис. К.1. Мікрофотографії нанесеного провідного матеріалу – алюмінію та графену, на основи груп зразків: а) М1000; б) Г1000

ДОДАТОК Л ТРИВИМІРНІ МОДЕЛІ ПОВЕРХНІ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПАПЕРОВИХ ОСНОВ



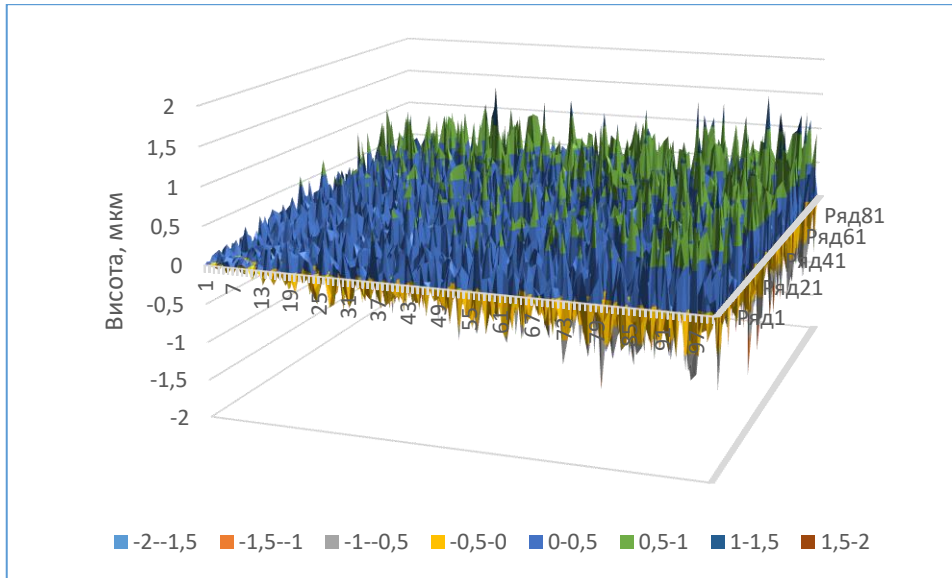


Рис. Л.3. Тривимірний модель поверхні досліджуваних паперових основ групи Г1000

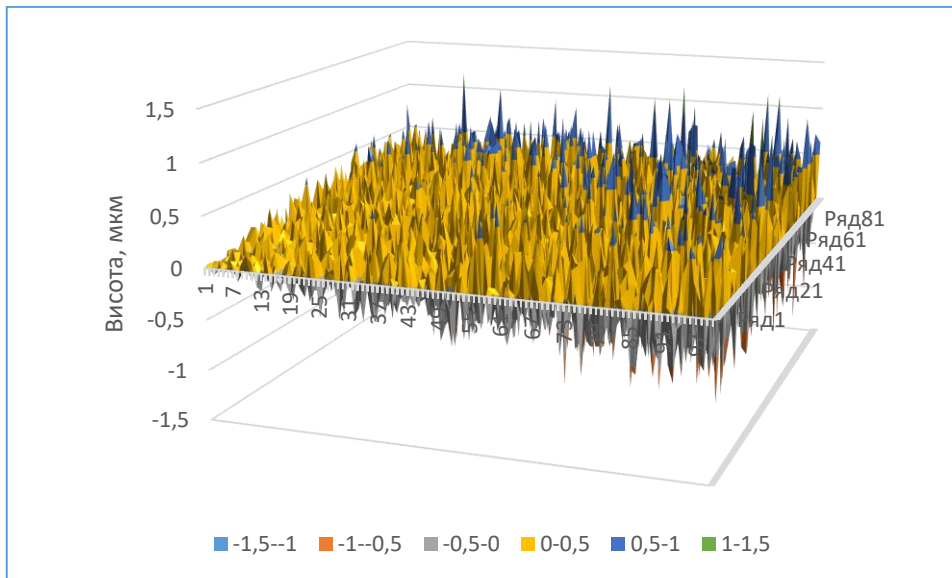


Рис. Л.4. Тривимірний модель поверхні досліджуваних паперових основ групи Г3000

ДОДАТОК М

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Т.в.о. директора навчально-наукового
видавничо-поліграфічного інституту

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Катерина ЗОЛОТУХІНА

14 січня 2026 р.

АКТ

про використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи Бардовського Богдана Олександровича

Дисертаційне дослідження аспіранта Бардовського Богдана Олександровича присвячене удосконаленню технологічного процесу формування струмопровідних шарів друкованої електроніки на паперових основах із використанням трафаретного друку. У роботі обґрунтовано доцільність застосування попередньої обробки поверхні паперу коронним розрядом як ефективного способу керованої модифікації мікрорельєфу та поверхневої енергії целюлозних матеріалів з метою підвищення адгезійних, електрофізичних та експлуатаційних характеристик друкованих провідних елементів. Запропоновані підходи спрямовані на забезпечення стабільності електричних параметрів струмопровідних доріжок та відтворюваності технологічних режимів у виробництві елементів гнучкої електроніки.

У межах дослідження встановлено вплив режимів попередньої обробки паперових основ коронним розрядом на морфологічні, змочувальні та фрактальні характеристики поверхні, а також на питомий електричний опір і зносостійкість струмопровідних доріжок, нанесених методами трафаретного друку та магнетронного напилення. Обґрунтовано раціональні параметри обробки коронним розрядом та термічної стабілізації, розроблено методики багатофакторної оцінки якості провідних шарів і визначено закономірності

взаємозв'язку між станом поверхні паперової основи та стабільністю електрофізичних властивостей друкованих елементів.

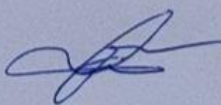
Результати досліджень використано у лекційних, лабораторних та практичних заняттях з дисциплін:

- Технології захисту друкованої продукції;
- Теоретичні та практичні основи забезпечення зносостійкості у видавництві та поліграфії;
- Теоретичні та практичні засади досліджень спеціалізованих видів паперу.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у підготовці здобувачів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» під час вивчення технологій створення елементів друкованої електроніки на паперових основах, зокрема процесів трафаретного друку струмопровідних шарів, методів попередньої обробки поверхні паперу та пост-стабілізації провідних структур. Отримані результати застосовуються під час виконання лабораторних, курсових і кваліфікаційних робіт, присвячених аналізу впливу властивостей основи та технологічних режимів нанесення на електрофізичні та експлуатаційні характеристики друкованих провідних елементів.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес сприяє формуванню у здобувачів системного розуміння взаємозв'язку між морфологічними та енергетичними характеристиками паперових основ, режимами попередньої обробки коронним розрядом і параметрами трафаретного друку та показниками якості струмопровідних шарів, зокрема стабільністю питомого електричного опору, адгезійною міцністю та зносостійкістю друкованих елементів гнучкої електроніки.

Т.в.о. завідувача кафедри технології
поліграфічного виробництва
доцент, кандидат технічних наук



Надія ТАЛІМОНОВА