



УДК 621.793:621.315.592

DOI: 10.20535/2077-7264.3(85).2024.319104

© Т. Ю. Киричок, д-р техн. наук, проф., Б. О. Бардовський, асп., Є. В. Авдяков, асп., М. Г. Душейко, провідний інженер, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ПАПЕРОВОЇ ОСНОВИ  
КОРОННИМ РОЗРЯДОМ НА ПРОВІДНІСТЬ  
МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ,  
НАНЕСЕНИХ МАГНЕТРОННИМ НАПИЛЕННЯМ**

**У статті досліджено вплив обробки поверхні коронним розрядом на електричні властивості струмопровідних доріжок, нанесених на паперові основи методом магнетронного напилення. Основна увага приділяється визначенню ефективних комбінацій типу паперу (матовий або глянцевої) і потужності коронного розряду (1000 Вт і 3000 Вт) для досягнення мінімально можливого електричного опору в струмопровідних доріжках. Дослідження закладає основу для майбутніх порівнянь між традиційними методами напилення та новими технологіями друку у виробництві гнучких та економічно ефективних електронних компонентів.**

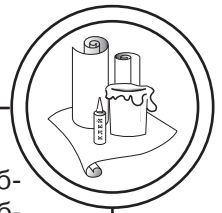
**Ключові слова:** обробка коронним розрядом; магнетронне напилення; металеві електроди; паперові основи; друкована електроніка; електрофізичні властивості металевих шарів; модифікація поверхні паперу; адгезійні властивості поверхні.

**Постановка проблеми**

У сфері друкованої електроніки, особливо тієї, що використовує гнучкі основи, численні проблеми перешкоджають створенню зносостійких електронних компонентів. Однією з таких проблем є ефективна підготовка та обробка паперових основ для підвищення їхньої сумісності та продуктивності для електронних застосувань. Це дослідження фокусується на використанні обробки коронним розрядом з подальшим вакуумним осадженням за тонко-

плівковою технологією на матові та глянцевої паперові основи. Існує необхідність вивчити потенціал звичайних паперових основ у більш традиційних процесах виробництва електроніки перед переходом до друкованої електроніки. Кінцевою метою є визначення методів обробки, які можуть покращити придатність паперових основ для електронних компонентів, тим самим подолавши розрив між традиційними технологіями та технологіями друкованої електроніки. Це дослідження

© Автор(и) 2024. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.  
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



має значення для просування використання гнучких основ, зокрема паперу, у розробці зносостійких та ефективних друкованих електронних пристроїв.

### **Аналіз попередніх досліджень**

Друкована електроніка — це галузь, що швидко розвивається і має потенціал для трансформації різних галузей, зокрема побутової електроніки, охорони здоров'я, енергетики тощо [1–4]. Переважно, ця технологія передбачає друк електронних схем і компонентів на гнучких основах за допомогою струмопровідних чорнил, що дозволяє виробляти легкі, гнучкі та економічно ефективні електронні пристрої [5]. Серед різних матеріалів, що досліджуються для друкованої електроніки, папір виділяється як перспективна основа завдяки своїй низькій вартості, здатності до біологічного розкладання та широкій доступності [6].

Однак природні характеристики поверхні паперу, такі як пористість, шорсткість і змінна поверхнева енергія, можуть створювати значні проблеми для ефективного осадження і роботи друкованих електронних компонентів [7]. Ці характеристики можуть призвести до поганої адгезії провідних матеріалів, що призводить до зниження провідності та надійності друкованих схем [8]. Тому покращення властивостей поверхні паперу має важливе значення для реалізації його потенціалу в друкованій електроніці.

Для покращення сумісності паперу з друкованою електронікою застосовуються різні методи обробки поверхні [9]. У дослідженні

запропоновано використання обробки коронним розрядом. Обробка коронним розрядом передбачає вплив на поверхню паперу високочастотного коронного розряду, який іонізує поверхню, що збільшує поверхневу енергію, що вже підтверджено відповідними дослідженнями [10]. Така обробка збільшує поверхневу енергію плівкових матеріалів [11]. Передбачається, що обробка матиме подібний ефект на паперову основу, що збільшить адгезію струмопровідних фарб, тим самим забезпечить рівномірність нанесеного шару. Підвищена поверхнева енергія сприяє кращому розтіканню та проникненню чорнила, що призводить до більш рівномірних та надійних струмопровідних шляхів [12].

Хоча обробка коронним розрядом пропонує сучасний підхід до збільшення придатності паперу для друкованої електроніки, важливо також порівняти ці досягнення з традиційними методами напилення. Технологія магнетронного напилення дозволяє точно контролювати товщину, однорідність і склад плівки [13, 14]. Таким чином, порівняння виробу, створеного методом друку на папері, з виробом, отриманим за допомогою магнетронного напилення, дозволить виявити сильні та слабкі сторони кожного з підходів.

Метод магнетронного напилення використовується для створення тонких провідних шарів на спеціальному папері з волокон срібла та арамідів (Ag/AFP) [14]. Він передбачає фізичне осадження матеріалу, на основу у вакуумно-середовищі, в результаті чого утворюється однорідна провідна плівка з високою адгезією. Про-



понується застосувати цей метод з новітнім підходом використання паперу, обробленого коронним розрядом, для друкованої електроніки.

Отже, хоча друкована електроніка на папері є багатообіцяючою технологією, її успіх залежить від ефективної обробки поверхні для подолання обмежень, притаманних паперу як основі. Обробка коронним розрядом дозволяє значно покращити адгезію та продуктивність друкованої електроніки на папері. Однак для повного розуміння потенціалу та обмежень кожного підходу необхідне ретельне порівняння з традиційними методами, такими як магнетронне напилення. Цей порівняльний аналіз допоможе визначити найбільш ефективні режими для виробництва надійних і високопродуктивних електронних пристроїв на паперових підкладках, що в кінцевому підсумку сприятиме розвитку і масштабуванню друкованої електроніки.

### Мета роботи

Основною метою цієї роботи є дослідження ефективності обробки поверхні паперу коронним розрядом для створення струмопровідних доріжок. Дослідження спрямоване на визначення придатності різних типів паперу (матового чи глянцевого) та ефективних режимів коронної обробки (різні рівні потужності коронного розряду) для досягнення найменшого електричного опору струмопровідних доріжок.

В дослідженні планується:

— Оцінити вплив потужності коронної обробки (Вт) на електричні властивості струмопровідних доріжок.

— Порівняти електричний опір струмопровідних доріжок на матовій та глянцевої поверхнях паперу.

— Визначити найбільш ефективну комбінацію типу паперу та режиму коронної обробки для досягнення найменшого опору в струмопровідних доріжках.

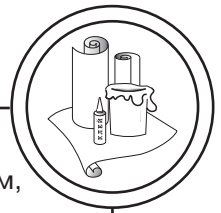
Дослідження спрямоване на підвищення продуктивності та надійності паперових основ у друкованій електроніці, що потенційно може допомогти досягти цільових показників готового виробу за допомогою методів друку.

### Результат проведених досліджень

З метою визначення придатності різних типів паперу для традиційної технології магнетронного напилення, а також аналізу варіантів режимів поверхневої обробки коронуванням, проведено підготовку відповідних зразків, їх подальше коронування, нанесення контактних доріжок і подальші вимірювання електричних параметрів доріжок.

Для кожного варіанту основи методика передбачає обробку коронним розрядом. Кожен зразок має бути розміром 60×90 см. Після обробки зразки були розділені на дві групи — оброблені та необроблені — для подальших експериментів з нанесенням топології. Для визначення більш ефективних параметрів обробки враховували потужність коронного розряду. В результаті було сформовано дві групи комбінацій значень параметрів потужністю для визначення найбільш ефективного режиму обробки.

Перед початком коронної обробки зразки паперу прикріплю-



вали до плівкового полотна клейкою стрічкою і пропускали через модуль коронатора разом з полотном.

Відповідно до кількості груп, сформовані комбінації параметрів зазначено в таблиці 1. Значення потужності обрано відповідно до значень, які застосовуються до матеріалів у виробництві.

Таблиця 1  
Параметри коронування  
поверхні зразків

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

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

- М0 — матовий папір без обробки;
- М1000 — матовий папір з режимом обробки 1000 Вт;
- М3000 — матовий папір з режимом обробки 3000 Вт;
- Г0 — глянцева папір без обробки;
- Г1000 — глянцева папір з режимом обробки 1000 Вт;
- Г3000 — глянцева папір з режимом обробки 3000 Вт.

У цьому дослідженні оцінюється вплив поверхневої обробки на провідні доріжки, створені за допомогою тонкоплівкової технології.

Розроблено топологію для проведення випробувань.

Технічні характеристики топології:

- Площа нанесення: 70×70 мм, що містить п'ять доріжок шири-

ною 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм і 5 мм, кожна довжиною 70 мм.

— Розмір тестового зразка: 80×70 мм, включаючи мітки вирівнювання.

— Дизайн створено за допомогою програмного забезпечення AutoCAD, а маску — за допомогою технології фотолітографії. Схема створення маски показана на рис. 1.

Підготовка маски [15]:

— 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.

Процес нанесення струмопровідних доріжок здійснювався за допомогою магнетронного розпилення алюмінієвих, титанових і хромових матеріалів в атмосфері аргону. При цьому використовувалася технологія фізичного осадження з газової фази (PVD): безпосереднє нанесення покриття на основу у високовакуумному середовищі, що дозволяє створити

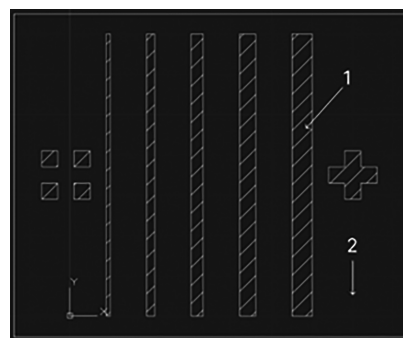


Рис. 1. Схема топології струмопровідних доріжок: 1 — струмопровідний шар; 2 — основа



тонку струмопровідну плівку без хімічних впливів, які могли б пошкодити основу.

Для створення тонких плівок використовується технологія PVD, яка широко застосовується у виробництві електронних компонентів. Процес полегшується катодним розпиленням, коли іони інертного газу (наприклад, аргону, Ar) бомбардують матеріал-мішень з високою енергією (в діапазоні від приблизно 100 еВ до 1 кеВ). Це бомбардування виштовхує атоми з мішені, які потім осідають на основу, утворюючи покриття [16]. 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 ідеально підходить для лабораторних і науково-дослідних цілей [17].

Пристрій для нанесення описано в навчальному посібнику Синтез та діагностика наноструктур [17], на рис. 2 зображено схему пристрою.

Установка складається [17] зі станини, на якій розміщені: горизонтальна вакуумна камера (ВК)

з кришкою що піднімається пневмоприводом, кутовий перехід (КП) з пневмоприводом високовакуумного затвору (ВВЗ) та фланця з перетворювачем іонізаційним манометричним (ІП), блоку пневмоклапанів керування вакуумною системою (БКВС), форвакуумного (ФН) та високовакуумного турбомолекулярного (ТВН) насосів з форвакуумними термопарними манометричними перетворювачами (ТП1,2), системи водяного охолодження елементів обладнання, вакуумних клапанів та 4-х шаф живлення та керування вакуумною системою і параметрами технологічного процесу. На дні ВК розміщені: карусель з елементами кріплення підкладок для 6 позицій, 5 магнетронних розпилюючих пристроїв (у подальшому магнетронів) та блок ІЧ нагрівачів з платиновим сенсором температури підкладок (з середини ВК), вакуумний електромеханічний привід обертання каруселі під час проведення циклу осадження плівок на підкладки (ззовні ВК) та 5-ть оглядових ілюмінаторів, що розташовані на бокових стінках вакуумної камери навпроти відпорного магнетрона.

На відміну від традиційної технології, для очищення основи ви-

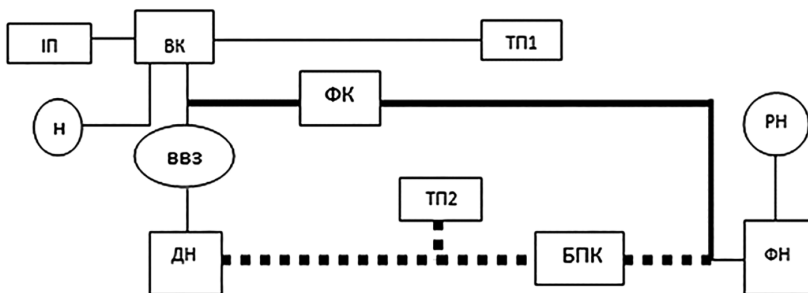
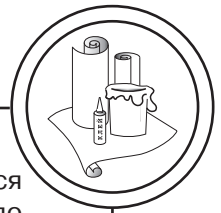


Рис. 2. Схема вакуумної системи установки [17]



користовувався повітряний роздув. Хімічного очищення чи травлення основи не відбувалось.

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

Процедура вимірювання:

1. Підготовка:

— Монтаж зразка: Фіксація паперової основи на столику, щоб запобігти її переміщенню.

2. Калібрування датчиків

— Калібрування відстані: налаштування відстані для щупів.

— Калібрування контактного опору: контактний опір клем має бути мінімальний і незначний.

3. Розташування щупів

— Позиціонування щупів: розташування двох щупів і клем по довжині провідної доріжки на паперовій основі.

— Вимірювання електричних параметрів: для отримання стабільних результатів проводиться триразове вимірювання, з допустимою похибкою 0,1 Ом.

Коронну обробку проводили за допомогою коронуючого генератора Ahlbrandt, основні характеристики наведені в табл. 2.

Процес напilenня проводився на установці Катод 1М.

Вакуумна камера готувалася шляхом відкачування повітря до тиску  $3,5 \times 10^{-6}$  мм рт.ст., з робочим тиском 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  $50^\circ \text{C}$  для десорбції абсорбованих папером газів.

Вимірювання показників нанесених доріжок проводяться за допомогою лабораторного мультиметру Dnipro-M SM600 [19]. За допомогою мультиметру проводиться вимірювання опору доріжок. Для нівелювання негативного ефекту протикання поверхні доріжок, через м'який профіль поверхні, використовуються мідні клєми, які забезпечують відсутність спотворень значень при вимірюваннях. Вимірювання проводиться на відстані 0,5 см від країв струмопровідної доріжки.

Для проведення експериментів, спрямованих на підвищення адгезійних властивостей різних типів паперових поверхонь, обрано

Таблиця 2

Технічні характеристики коронуючого генератора Ahlbrandt [18]

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



## Основи паперу

Характеристика	Значення	
	Основа 1	Основа 2
Тип	Глянцевий	Матовий
Маса 1 м <sup>2</sup> , 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

зразки, що характеризуються основним призначенням та типом: гляцеві та матові. Відповідні зразки та їх параметри наведено в табл. 3.

Основи були об'єднані в групи залежно від типу паперу: до групи 1 увійшов гляцевий папір, до групи 2 — матовий 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.

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

Напилення відбувалось з використанням таких матеріалів:

- алюміній (А999) [20],
- хром (електролітичний ERC)

[21],

- титан (VT 10) [22].

Комбінації матеріалів:

- 1) основний шар — алюміній;
- 2) основний шар — алюміній,

підшар — хром;

3) основний шар — алюміній, підшар — титан.

Результати вимірювань відображені в табл. 4.

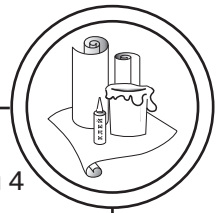
Відповідно до отриманих даних по кожній із обраних параметрів ширини струмопровідної доріжки обиралось найменше значення опору, яке виступає еталонним значенням. Обрані значення зазначені в табл. 5.

На основі еталонних значень розраховано дельту різниці значень для кожної основи та нанесеного матеріалу. Відповідні значення відображені в діаграмах на рис. 3–8.

Середні значення опору для матового паперу, з режимом обробки 3000 Вт з підшаром хрому продемонстрували найменші значення для всіх ширин струмопровідних доріжок в рамках дослідження.

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





Таблиця 4

Результати вимірювань опору доріжок

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	Середнє значення, Ом	—	—	—	—	—
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	—	—	—

Таблиця 5

Обрані значення опору

Ширина доріжки, мм	Значення опору, Ом	Основа, режим обробки, нанесений матеріал
1	10,80	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
2	4,76	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
3	2,43	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
4	1,93	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому
5	2,76	Матовий папір, 3000 Вт, алюміній з підшаром хрому



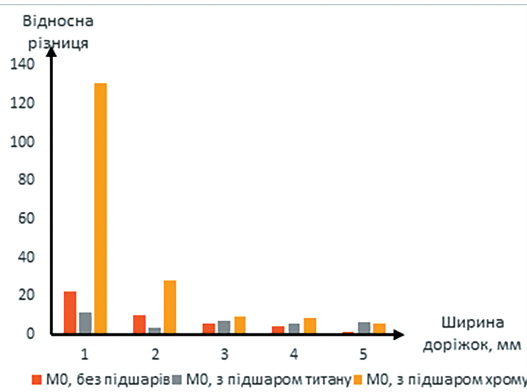


Рис. 3. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ M0

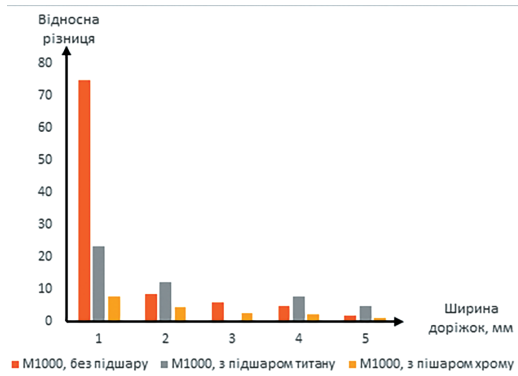


Рис. 4. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ M1000

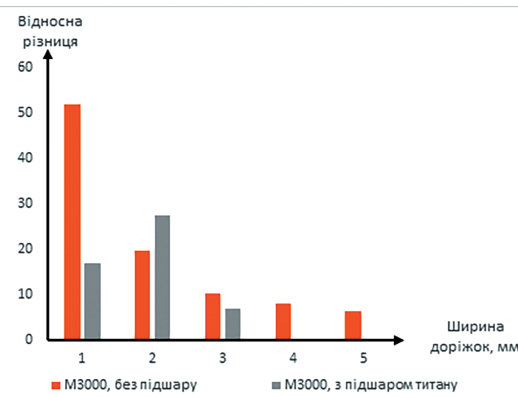


Рис. 5. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ M3000

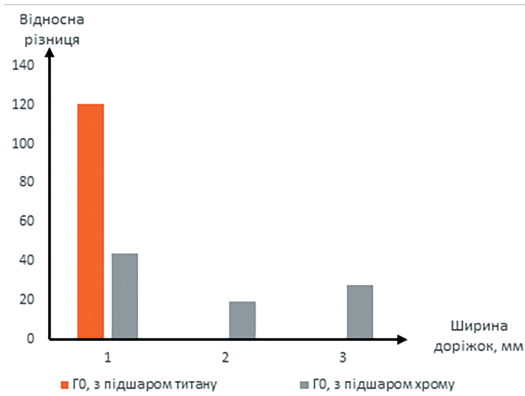
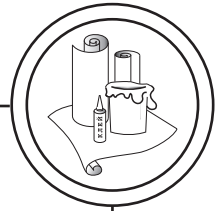


Рис. 6. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ Г0

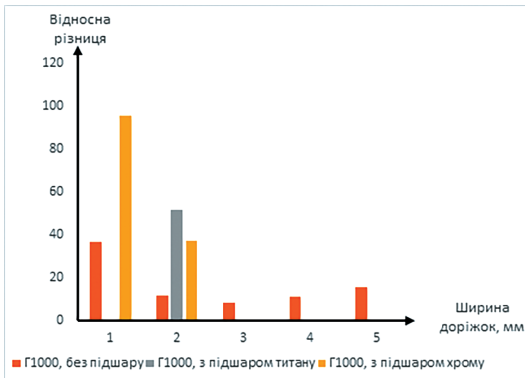


Рис. 7. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ Г1000

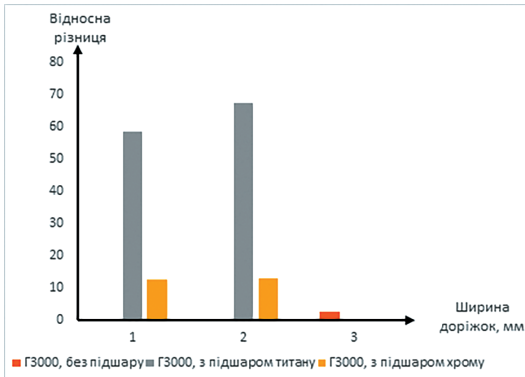
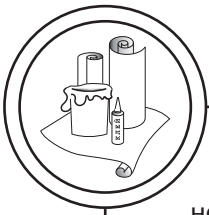


Рис. 8. Відносна різниця опору доріжок порівняно з обраним еталоном групи основ Г3000



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, та групи глянцевого паперу з підшаром хрому з обробкою та без — спостерігаються наступні явища:

— Струмопровідна доріжка демонструє повну відсутність контакту.

— Відсутність стабільних показників при серії вимірювань в межах похибки.

— Зависокі та нестабільні показники опору порівняно з аналогічними вимірюваннями в інших групах.

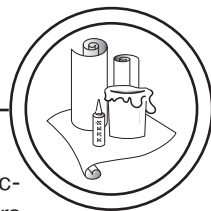
Отже, глянцева папір показує найбільш стабільний опір при обробці коронним розрядом потужністю 1000 Вт, без використання підшарів. Матовий папір демонструє нижчий опір, особливо при обробці 1000 Вт і 3000 Вт, а також використанні підшару хрому.

## Висновки

Дослідження продемонструвало вплив обробки поверхні коронним розрядом на електричні властивості струмопровідних доріжок, нанесених на паперові основи методом магнетронного напилення. Аналізуючи опір доріжок на матовому і глянцевому паперах, оброблених різними рівнями коронного розряду, виявлено, що обробка впливає на ефективність струмопровідних доріжок, причому певні комбінації типу паперу і режиму обробки призводять до зниження опору. Хоча ці початкові результати вказують на те, що обробка поверхні може підвищити продуктивність електроніки на основі паперу за допомогою магнетронного напилення, майбутні дослідження включатимуть методи друку. Наступний етап дозволить порівняти результати напилення та друку, що дасть змогу отримати повне уявлення про ефективність обробки поверхні перед різними методами виробництва.

## Список використаної літератури

1. Jie Hu. Advances in paper-based point-of-care diagnostics / Jie Hu, ShuQi Wang, Lin Wang, Fei Li, Belinda Pingguan-Murphy, Tian Jian Lu, Feng Xu // *Biosensors and Bioelectronics*. 2014. Volume 54. pp. 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.075>.
2. Yuxin He. Wearable Strain Sensors Based on a Porous Polydimethylsiloxane Hybrid with Carbon Nanotubes and Graphene / Yuxin He, Dongyang Wu, Mengyang Zhou, Yanjun Zheng, Tengfei Wang, Chang Lu, Li Zhang, Hu Liu, Chuntai Liu // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. 13(13). pp. 15572–15583. DOI: 10.1021/acsami.0c22823.
3. Y. Khan. A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics / Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, A. C. Arias // *Adv. Mater*. 2020. 32. pp. 1905279. <https://doi.org/10.1002/adma.201905279>.
4. Киричок Т. Ю. Класифікація методів друку та матеріалів друкованої електроніки / Т. Ю. Киричок, Б. О. Бардовський // *Технологія і техніка друкарства*. 2023. (4(82)). pp. 22–40. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.291596](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596).



5. Yieu Chyan. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food / Yieu Chyan, Ruquan Ye, Yilun Li, Swatantra Pratap Singh, Christopher J. Arnusch, James M. Tour // *ACS Nano*. 2018. 12(3). pp. 2176–2183. DOI: 10.1021/acsnano.7b08539.

6. Park S. Laminating Structure for Interlayer Corona Discharge Treatment Toward Ion-Based Nanogenerators / S. Park, J. Lee, D. Kong, J. Choi, H. Jung, Y. Park, H. Park, J. Jung, M. Lee // *Small Methods*. 2023. 7. <https://doi.org/10.1002/smt.202300097>.

7. Prezas P. Bioactivity Enhancement of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings through Non-Contact Corona Electrical Charging / P. Prezas, M. Soares, J. Borges, J. Silva, F. Oliveira, M. Graça // *Nanomaterials*. 2023. 13(6). pp. 1058. <https://doi.org/10.3390/nano13061058>.

8. Wilkinson N. J. A review of aerosol jet printing — a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing / N. J. Wilkinson, M. A. A. Smith, R. W. Kay et al. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. 105. pp. 4599–4619. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03438-2>.

9. Álvaro Torrinha. Electrochemical (bio)sensors based on carbon cloth and carbon paper: An overview / Álvaro Torrinha, Simone Morais // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021. Volume 142. pp. 116324. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116324>.

10. Morić M. Effect of corona power on the CMY reproduction quality with ElectroInk printed on fine art paper / M. Morić, I. Majnarić, M. Barišić // *Cellulose Chemistry and Technology*. 2020. 54(1–2). pp. 103–111. DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.12.

11. Li H. Insight into the remaining high surface energy of atmospheric DBD plasma-treated polyethylene web after three months' aging / H. Li, Z. Wang, L. Yang, Q. Chen // *Plasma Science and Technology*. 2019. 21(1). art. no. 015504. DOI: 10.1088/2058-6272/aae2ad.

12. Kou R. Flow electrification of corona-charged polyethylene terephthalate film / R. Kou, Y. Zhong, Y. Qiao // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2020. Vol. 36(32). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01596>.

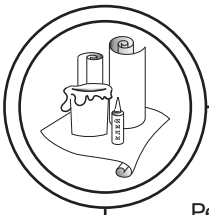
13. Wei Gao. Flexible Electronics toward Wearable Sensing / Wei Gao, Hiroki Ota, Daisuke Kiriya, Kuniharu Takei, Ali Javey // *Accounts of Chemical Research*. 2019. 52(3). pp. 523–533. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00500.

14. Shuaihang Zhu. Clean surface additive manufacturing of aramid paper-based electrically heated devices for medical therapy application / Shuaihang Zhu, Ching-Wen Lou, Shaohua Zhang, Na Wang, Jiwei Li, Yujie Feng, Ruidong He, Changgang Xu, Jia-Horng Lin // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Volume 29. pp. 101689. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101689>.

15. 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. К: НТУУ «КПІ», 2016. 400 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.fel.ntukpi.kiev.ua>.

16. Технологічні основи електроніки. Книга 1. Технологія виробництва мікросхем: навч. посіб. / А. І. Кузьмичев, Л. Д. Писаренко, Л. Ю. Цибульський. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 127 с.

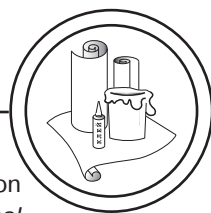
17. Синтез та діагностика наноструктур: Лабораторний практикум: навч. посіб. / А. В. Іващук. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 41 с.



18. Corona Ahlbrandt Generators // Baldwintech. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://baldwintech.com/corona-ahlbrandt-generators>.
19. Мультиметр цифровий Dnipro-M SM600. DNIPRO-M — Офіційний інтернет магазин. Інструменти та обладнання. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://dnipro-m.ua/tovar/multimetr-czifrovoj-sm600/?campaignid=17724767207&adgroupid=&targetid=&adid=&network=x&keyword=&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YLyJuyI8rAyp9ARB0IORRy0yDs6D8qoQ7cz0SPiLsmP3KFEL4\\_5VBPxoCbZgQAvD\\_BwE](https://dnipro-m.ua/tovar/multimetr-czifrovoj-sm600/?campaignid=17724767207&adgroupid=&targetid=&adid=&network=x&keyword=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YLyJuyI8rAyp9ARB0IORRy0yDs6D8qoQ7cz0SPiLsmP3KFEL4_5VBPxoCbZgQAvD_BwE).
20. 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.
21. ASTM A481-05. Standard Specification for Chromium Metal. ASTM International. West Conshohocken. PA, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.astm.org/a0481-05r20.html>.
22. ASTM B265-20. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate. ASTM International. West Conshohocken. PA, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.astm.org/b0265-20.html>.

### References

1. Hu, J., Wang, S., Wang, L., Li, F., Pingguan-Murphy, B., Lu, T. J., & Xu, F. (2014). Advances in paper-based point-of-care diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 54, 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.075>.
2. He, Y., Wu, D., Zhou, M., Zheng, Y., Wang, T., Lu, C., Zhang, L., Liu, H., & Liu, C. (2021). Wearable Strain Sensors Based on a Porous Polydimethylsiloxane Hybrid with Carbon Nanotubes and Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(13), 15572–15583. DOI: 10.1021/acsami.0c22823.
3. Khan, Y., Thielens, A., Muin, S., Ting, J., Baumbauer, C., & Arias, A. C. (2020). A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics. *Adv. Mater.*, 32, 1905279. <https://doi.org/10.1002/adma.201905279>.
4. Kyrychok, T. Yu., & Bardovskyi, B. O. (2023). Klasyfikatsiia metodiv druku ta materialiv drukovanoi elektroniky. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (4(82)), 22–40. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.291596](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596) [in Ukrainian].
5. Chyan, Y., Ye, R., Li, Y., Singh, S. P., Arnusch, C. J., & Tour, J. M. (2018). Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food. *ACS Nano*, 12(3), 2176–2183. DOI: 10.1021/acsnano.7b08539.
6. Park, S., Lee, J., Kong, D., Choi, J., Jung, H., Park, Y., Park, H., Jung, J., & Lee, M. (2023). Laminating Structure for Interlayer Corona Discharge Treatment Toward Ion-Based Nanogenerators. *Small Methods*, 7. <https://doi.org/10.1002/smt.202300097>.
7. Prezas, P., Soares, M., Borges, J., Silva, J., Oliveira, F., & Graça, M. (2023). Bioactivity Enhancement of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings through Non-Contact Corona Electrical Charging. *Nanomaterials*, 13(6), 1058. <https://doi.org/10.3390/nano13061058>.
8. Wilkinson, N. J., Smith, M. A. A., Kay, R. W., & et al. (2019). A review of aerosol jet printing — a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing / N. J. Wilkinson. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 105, 4599–4619. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03438-2>.



9. Torrinha, Á., & Morais, S. (2021). Electrochemical (bio)sensors based on carbon cloth and carbon paper: An overview. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 142, 116324. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116324>.

10. Morić, M., Majnarić, I., & Barišić, M. (2020). Effect of corona power on the CMY reproduction quality with ElectroInk printed on fine art paper. *Cellulose Chemistry and Technology*, 54(1–2), 103–111. DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.12.

11. Li, H., Wang, Z., Yang, L., & Chen, Q. (2019). Insight into the remaining high surface energy of atmospheric DBD plasma-treated polyethylene web after three months' aging. *Plasma Science and Technology*, 21(1), 015504. DOI: 10.1088/2058-6272/aae2ad.

12. Kou, R., Zhong, Y., & Qiao, Y. (2020). Flow electrification of corona-charged polyethylene terephthalate film. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, Vol. 36(32). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01596>.

13. Gao, W., Ota, H., Kiriya, D., Takei, K., & Javey, A. (2019). Flexible Electronics toward Wearable Sensing. *Accounts of Chemical Research*, 52(3), 523–533. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00500.

14. Zhu, S., Lou, C.-W., Zhang, S., Wang, N., Li, J., Feng, Y., He, R., Xu, C., & Lin, J.-H. (2022). Clean surface additive manufacturing of aramid paper-based electrically heated devices for medical therapy application. *Surfaces and Interfaces*, Vol. 29, 101689. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101689>.

15. Yakymenko, Yu. I., Zaiachuk, D. M., Spivak, V. M., Orlov, A. T., Bohdan, O. V., & Koval, V. M. (2016). *Osnovy nanoelektroniky: Kn. 2 'Materialy i nanoelektronni tekhnolohii' [Fundamentals of nanoelectronics: in 2 books. Book 2 'Materials and nanoelectronic technologies']*. Kyiv: NTUU 'KPI', 400 p. Retrieved from <http://www.fel.ntukpi.kiev.ua> [in Ukrainian].

16. Kuzmychev, A. I., Pysarenko, L. D., & Tsybul'skyi, L. Yu. (2019). *Tekhnolohichni osnovy elektroniky. Knyha 1. Tekhnolohiia vyrobnytstva mikroskhem [Technological fundamentals of electronics. Book 1. Microcircuit production technology]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho, 127 p. [in Ukrainian].

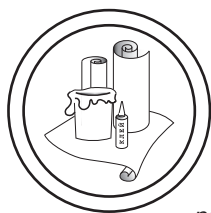
17. Ivashchuk, A. V. (2019). *Synteza ta diahnozyka nanostruktur: Laboratornyi praktykum [Synthesis and diagnostics of nanostructures: Laboratory practical]*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 41 p. [in Ukrainian].

18. (2024). Corona Ahlbrandt Generators. *Baldwintech*. Retrieved from <https://baldwintech.com/corona-ahlbrandt-generators>.

19. *Multymetr tsyfrovyi Dnipro-M SM600. DNIPRO-M – Ofitsiyni internet mahazyn. Instrumenty ta obladnannia [Digital multimeter Dnipro-M SM600. DNIPRO-M – Official online store. Tools and equipment]*. Retrieved from [https://dnipro-m.ua/tovar/multymetr-czifrovoj-sm600/?campaignid=17724767207&adgroupid=&targetid=&adid=&network=x&keyword=&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YLyJuyI8rAyp9ARB0IORRy0yDs6D8qoQ7cz0SPiLsmP3KFEL4\\_5VBPxoCbZgQAvD\\_BwE](https://dnipro-m.ua/tovar/multymetr-czifrovoj-sm600/?campaignid=17724767207&adgroupid=&targetid=&adid=&network=x&keyword=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwmaO4BhAhEiwA5p4YLyJuyI8rAyp9ARB0IORRy0yDs6D8qoQ7cz0SPiLsmP3KFEL4_5VBPxoCbZgQAvD_BwE) [in Ukrainian].

20. (2018). 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.

21. (2020). ASTM A481-05. *Standard Specification for Chromium Metal*. ASTM International. West Conshohocken, PA. Retrieved from <https://www.astm.org/a0481-05r20.html>.



22. (2020). ASTM B265-20. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate*. ASTM International. West Conshohocken, PA. Retrieved from <https://www.astm.org/b0265-20.html>.

**The paper investigates the effect of corona discharge surface treatment on the electrical properties of conductive tracks deposited on paper substrates by the method of magnetron sputtering. The main focus is on determining the effective combinations of paper type (matte or glossy) and corona discharge power (1000 W and 3000 W) to achieve the lowest possible electrical resistance in conductive tracks. By analyzing the effectiveness of these treatments, the study aims to improve the suitability of paper as a substrate for high-performance printed electronics. The results show that certain combinations of paper type and processing mode have a significant impact on the resistance of conductive tracks. The study lays the foundation for future comparisons between traditional sputtering methods and new printing technologies in the production of flexible and cost-effective electronic components.**

**Keywords: corona discharge treatment; magnetron sputtering; metal electrodes; paper substrates; printed electronics; electrophysical properties of metal layers; paper surface modification; surface adhesion properties.**

Надійшла до редакції 26.08.24