

УДК 678.06: 676.224+676.22.017  
DOI: 10.20535/2077-7264.4(82).2023.291596

© Т. Ю. Киричок, д-р техн. наук, проф., Б. О. Бардовський,  
асп., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ДРУКУ ТА МАТЕРІАЛІВ ДРУКОВАНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Стаття представляє комплексну структурну класифікацію методів друку та основ у сфері друкованої електроніки. Завдяки широкому огляду літератури, різні методи друку та матеріали основи проаналізовано та класифіковано на основі їхніх характеристик і застосувань. Системна класифікація надає дослідникам, практикам і професіоналам галузі структурований огляд доступних методів друку та основ у сфері друкованої електроніки. Результати та висновки цього дослідження пропонують рекомендації щодо вибору та використання методів друку та основ у виготовленні електронних пристроїв.

**Ключові слова:** друкована електроніка; методи друку; шорсткість основи; профіль поверхні; флексографічний друк; трафаретний друк; струминний друк; струмопровідні чорнила; гнучкі основи; задруковуваний матеріал.

### Постановка проблеми

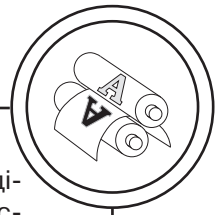
У галузі друкованої електроніки, особливо на гнучких основах, існує кілька критичних проблем, які перешкоджають досягненню раціональних параметрів продукції. Ці проблеми включають труднощі в досягненні рівномірного і стабільного зчеплення фарби/чорнила на гнучких основах, прогалину в стандартизованих методах обробки для покращення провідності та сумісності основи, а також труднощі в підтримці стабільної якості друку на різних гнучких матеріалах. Крім того, бракує комплексних досліджень, які б вирішували ці специфічні проблеми, що призводить до того, що

надмірна увага приділяється розробці нових основ і адаптації методів друку, а не вдосконаленню існуючих, більш доступних матеріалів. Ця прогалина підкреслює необхідність зосередитися на ефективній підготовці гнучких основ, забезпечуючи їх належну адаптацію для електронного друку. Вирішення цих проблем має значення для розвитку галузі друкованої електроніки та використання потенціалу гнучких основ.

### Аналіз попередніх досліджень

Друкована електроніка — це технологія, яка швидко розвивається, і революціонує спосіб

© Автор(и) 2023. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.  
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



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, включаючи охорону здоров'я [1, 2], транспорт [2], енергетику [3] та багато інших сфер [1–5]. 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 [6].

Друкована електроніка — це тип технології, яка дозволяє друкувати електронні схеми, датчики та інші компоненти на різних основах, таких як пластик [2], папір [2] або навіть тканина [7], використовуючи такі методи друку, як струминний [1] або трафаретний друк [2]. Цей метод виробництва електронних пристроїв має багато переваг перед традиційними методами, включаючи нижчу вартість, швидке виробництво та можливість створювати індивідуальні конструкції [8].

Друкована електроніка зазвичай складається з кількох шарів, включаючи електропровідні фарби [1], діелектричні матеріали [6] та іноді півпровідники [9]. Провідні чорнила використовуються для створення схем та інших елек-

тронних компонентів, тоді як діелектричні матеріали використовуються як ізолятори для запобігання коротким замиканням [1, 9]. Півпровідники використовуються для створення таких компонентів як транзистори та діоди [2].

Процес створення друкованої електроніки зазвичай включає проектування електронної схеми за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке потім друкується на основі за допомогою принтера [1]. Принтер наносить провідні чорнила, діелектричний матеріал та інші шари в певному порядку, зазвичай використовуючи кілька проходів для створення схеми та компонентів шар за шаром [1, 9, 10].

Після того, як схеми та компоненти надруковані, їх можна підключити до зовнішніх джерел живлення та інших компонентів для створення функціональних електронних пристроїв. Друкована електроніка має широкий спектр потенційних застосувань, у тому числі в носимих пристроях, розумному пакуванні та гнучких дисплеях [11].

Друкована та звичайна електроніка відрізняються за наступними параметрами: виробничий процес [1, 12]; матеріали [1, 12]; гнучкість і розмірність [1]; вартість і масштабованість [1]; застосування [1, 13].

Загалом, у той час як звичайна електроніка вирізняється високою продуктивністю, друкована електроніка пропонує унікальні переваги, такі як гнучкість, низька вартість виробництва та можливість інтегрувати електроніку в нетрадиційні форм-чинники [1, 2, 14, 15].



### *Основи для друкованої електроніки*

Шаблони для друкованої електроніки формуються на різних гнучких основах, включаючи папір, поліетилентерефталат і поліімід [16].

Папір як основа може використовуватися для створення бездротових девайсів при застосуванні струминного друку [1, 5], а саме:

- RFID-мітки для відстеження та ідентифікації товарів;
- розумні етикетки для надання інформації про продукцію;
- електронні датчики;
- електроди для акумуляторів.

Деякі методи передбачають покриття паперу полімерним матеріалом. Цей проміжний шар дозволяє створити товсту, компактну та щільну поверхню з покращеними електричними характеристиками та властивостями адгезії, більш стабільну та відтворювану реакцію під час деформації та напруги згину [17].

Зазначається, що пористі основи, такі як папір і текстиль, можуть поглинати чорнила та спричиняти їх розтікання, що може призвести до зниження роздільної здатності та провідності. Однак пористість основи також може бути корисною, забезпечуючи кращу інфільтрацію та адгезію чорнила [7].

Дослідження показали [2], що покриття паперу відповідними полімерними матеріалами дозволяє створювати щільні та стабільні шари з покращеними електричними та адгезійними властивостями, забезпечуючи надійність навіть при деформації та згині. Крім того, пористість, при-

таману паперовим основам, можна використовувати для покращення інфільтрації та адгезії чорнила/фарби, сприяючи покращенню продуктивності. Приклади таких паперових матеріалів як синтетичний папір Teslin [1], безкислотний копіювальний папір з лужним резервом (Cartiere Miliani Fabriano) [17], папір PEL P60 від Printed Electronics [18], спеціальний папір для друкованої електроніки виробництва Xerox (Gyricon) [19], фотопапір типу 3 виробництва Felix Schoeller (FS3) [20], демонструють універсальність і потенціал цієї основи.

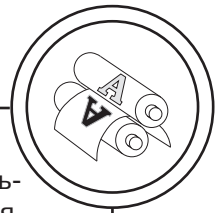
Так, наприклад, в роботі «Support for Electronic Circuits» [21] окреслено певні вимоги до паперових основ, які можливо використовувати для друку елементів електроніки. Паперова основа для друку електронних схем струмопровідними чорнилами має такі ключові характеристики [21]:

— мікропористий шар: основа складається з основного матеріалу, доповненого мікропористим шаром. Цей мікропористий шар має пори із середнім розміром менше 100 нм.

— оптимальний розмір пор: середній розмір пор у мікропористому шарі зазвичай знаходиться в діапазоні від 5 до 50 нм.

— шорсткість поверхні: мікропористий шар тонко сконструйований, з шорсткістю поверхні менше 1 мкм, що оцінюється параметром  $R_z$  відповідно до стандарту DIN 4768.

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



Досліджуються різні методи інтеграції жорстких мікроелектронних компонентів у текстиль, включаючи фізичні, механічні та хімічні підходи. Обговорюються три рівні інтеграції: адаптований до текстилю, інтегрований в текстиль та на основі текстилю. Однак електронний інтегрований текстиль, та елементи адаптовані до текстилю, не змогли ефективно показати себе в плані гнучкості та можливості прання. Дослідники вивчали інтеграцію мікроелектроніки в текстиль на рівні волокна або пряжі, що призвело до нового методу інтеграції на основі текстилю, який має такі переваги, як гнучкість і можливість прання [22].

Щоб досягти нового інтерактивного досвіду між електронними пристроями та людьми, зручну та легку електроніку, яку можна носити, успішно виготовлено з використанням тканин та електроволокон [13].

Основи на базі пластику мають можливість економічно ефективної обробки великих обсягів за допомогою застосування рулонного друку. 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, щоб замінити скло. Наразі жодна поліетиленова плівка не має всіх цих властивостей, тому необхідна багатошарова композитна структура, що вказано в [23].

Шаблони, надруковані на пластикових основах, зберігають високу електропровідність навіть після серйозних циклів згинання.

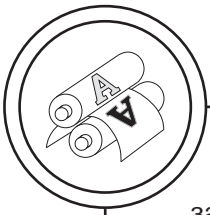
Провідність шаблонів досягається після термічного відновлення, що досліджено в [16].

Плівка з полііміду характеризується високою гнучкістю, що доведено в [24]. Однак схильність до негативного термічного і механічного впливу під час робочих умов використання пристрою впливають на сфери застосування таких плівок, що показано в [25].

PLA-пластик, полідиметилсилоксан, полівінілацетат, полікапролактон (PCL), полімолочна спільно гліколева кислота (PLGA), поліуретан (PU), полібутиленсукцинат (PBS) і поліетиленгліколь (PEG) є прикладами біологічно розкладаних полімерів, які можна використовувати як основу. PLA-пластик є жорстким, прозорим полімером з повільною швидкістю кристалізації та низькою термостійкістю, механічні властивості та термостійкість якого можна покращити. Полідиметилсилоксан є високоеластичним біосумісним полімером, який можна використовувати як основу в електроніці, що розтягується, що представлено в [2].

Отже, класифікація цих матеріалів як органічних ґрунтується на їхньому хімічному складі, в основі якого лежить переважно вуглець, незалежно від того, чи є вони природними або синтетичними. Їх органічна природа суттєво впливає на їх фізичні та хімічні властивості, що робить їх корисними в електроніці.

Неорганічні основи, такі як скло, метали, основи на базі кремнію, широко використовуються в друкованій електроніці відповідно до своїх властивостей і робочих характеристик [12, 25–27].



Фольга з нержавіючої сталі забезпечує додаткову міцність основи, що доведено в [24].

Розглядається використання жорсткої кремнієвої пластини як основи для отримання надтонких мікросхем. Висвітлюються проблеми, пов'язані з використанням кремнію як підкладки для гнучкої електроніки, такі як його крихка природа та плоска структура, що визначено в [13]. Також в якості подібної основи може використовуватись цирконат-титанат свинцю, що зазначено в [2].

Як правило, друковані плати виготовлені з використанням епоксидної скловолоконної панелі, на якій електропровідні мідні доріжки нанесені та витравлені для з'єднання електронних компонентів, що доведено в [28].

Молібден, алюміній і нікель є металевими основами, які зазвичай використовуються в друкованій електроніці. Ці металеві основи пропонують відмінну електропровідність, механічну стабільність і здатність керувати температурою. Металеві основи можуть бути відносно дорогими порівняно з іншими матеріалами основ [18].

Скло, метали та основи на базі кремнію класифікуються як неорганічні через їхній хімічний склад і властивості, які відрізняються від органічних матеріалів: відсутністю вуглецевої структури; фізичними та хімічними властивостями.

У галузі електроніки ця відмінність важлива, оскільки фізичні, хімічні та електричні властивості неорганічних матеріалів, таких як скло, метали та кремній, роблять їх придатними для різних

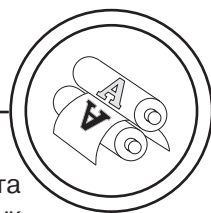
застосувань порівняно з органічними матеріалами. Наприклад, в електронних пристроях неорганічні основи часто використовуються там, де потрібна жорсткість, висока термостійкість і електропровідність.

Гібридні паперові основи створюються шляхом поєднання паперу з іншими матеріалами, такими як полімери або наночастинки, для покращення їхніх властивостей для друкованих електронних пристроїв. Гібридні паперові основи пропонують унікальне поєднання властивостей, включаючи гнучкість, легкість і можливість друку. Властивості гібридних паперових основ залежать від конкретної комбінації використовуваних матеріалів [29].

#### *Методи друку для друкованої електроніки*

Методи друку відіграють вирішальну роль у виробництві друкованої електроніки. Існує кілька методів друку, які зазвичай використовуються, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Найпоширеніші методи включають трафаретний, струминний, флексографічний і глибокий друк [1, 2, 7, 16, 18].

Трафаретний друк є найпоширенішим методом друку для друкованої електроніки. Це простий і економічно ефективний метод, який дозволяє друкувати на різноманітних основах. Він зазвичай використовується з такими основами як скло, поліестер і поліетилентерефталат (ПЕТ) [29–31]. Паперові основи, що використовують з трафаретним друком для друкованої електроніки: ArjoWigginsPowerCoatXD200 [32], целюлозний папір Whatman n1 (WCP)



від Sigma-Aldrich [33], папір Spantex і Cristal (обидві торгові марки Ahlstrom) [34].

Тампонний друк — цей метод використовується як альтернатива трафаретному друку, наприклад, для друку транзисторних електродів [2].

Флексографічний друк — зазвичай використовується для таких матеріалів як папір, картон і пластикові плівки [26]. Серед марок паперу, який використовується можна виділити — папір крейдований Stora Enso NovaPress Silk масою 1 м<sup>2</sup> 80 г, папір крейдований UPM Finesse Premium Silk масою 1 м<sup>2</sup> 150 г, папір крейдований, надгладкий TS для друкованої електроніки Arjo Wiggins PowerCoat HD масою 1 м<sup>2</sup> 95 г [28].

Глибокий друк — зазвичай використовується для таких основ як папір, пластикові плівки та металева фольга [26]. Серед прикладів паперу, що застосовується — фотопапір, придбаний у IMACOLOR, покритий мікропористою смолою [35], експериментальний папір від Paper Co. Ltd [36].

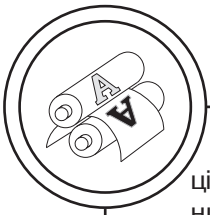
Методи глибокого, офсетного та флексографічного друку частіше використовуються для великих обсягів виробництва, таких як сонячні батареї. Офсетний і флексографічний друк в основному використовується для неорганічних і органічних провідників [2].

Методи друку без форм, також відомі як методи безконтактного друку, широко використовуються в друкованій електроніці через їхню універсальність, високу роздільну здатність і можливість працювати з різними основами. Серед основних варіан-

тів — це струминний друк та аерозольний струминний друк [4, 27, 32, 37, 38].

Струминний друк набув популярності в останні роки завдяки високій роздільній здатності та можливості друкувати широкий спектр матеріалів. Струминний друк може створювати складні шаблони з високою точністю, що робить його придатним для друку схем та датчиків. Основні показники, за якими струминний друк корисний в сфері друкованої електроніки — низька вартість процесу і широка розповсюдженість технології [1, 16, 18, 20, 23]. Основні його підтипи: безперервний струминний друк, струминний друк «on demand», термічний струминний друк, п'єзоелектричний струминний друк, електростатичний струминний друк. Кожен метод струминного друку використовує різні способи створення та доставки крапель, що призводить до різної швидкості друку, роздільної здатності та розміру краплі. Він зазвичай використовується з такими основами як папір, пластик і металева фольга. Паперові основи, що використовуються для струминного друку — синтетичний папір Teslin [1], папір PEL P60 від Printed Electronics [18], спеціальний папір для друкованої електроніки виробництва Xerox (Gyricon) [19].

Аерозольний струминний друк — це безконтактний метод друку, який використовує сфокусований аерозольний потік провідних або функціональних чорнил для створення шаблонів на основі. Він зазвичай використовується для друку високої роздільної здатності та високофунк-



ціональної електроніки. Аерозольний струминний друк дозволяє друкувати безпосередньо на основах без масок або пластин. Однак системи аерозольного струминного друку можуть бути складними та дорогими [2, 3].

Електрогідродинамічний друк (EHD-друк), також відомий як електростатичний або електророзпилювальний друк — це адитивна техніка виробництва, яка використовується в друкованій електроніці для нанесення функціональних матеріалів на основу. Основна перевага — висока роздільна здатність: EHD-друк може створювати шаблони високої роздільної здатності, як правило, у діапазоні від мікрметра до нанометра, що дозволяє виготовляти складні елементи та схеми. Основний недолік — досягнення стабільного та точного утворення крапель при друку EHD вимагає ретельного контролю різноманітних параметрів, таких як напруга, швидкість потоку та властивості чорнила [3].

Мікроконтактний друк — це технологія, що використовується для перенесення структур на цільову основу. Цей процес передбачає використання еластомерного штампа із шаблоном, який конформно контактує з поверхнею. Відмінностями є точний контроль і вирівнювання штампів з точністю до мікрметра. За допомогою цього методу друкування можна створювати багаторазові копії двовимірних шаблонів. Цей метод особливо корисний там, де потрібні тонкі, детальні шаблони, наприклад, при виготовленні датчиків і електронних компонентів на великих гнучких основах [6].

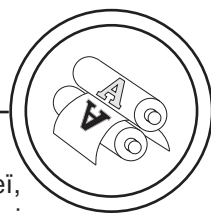
Наноімпринтинг — це техніка, яка використовується в друкованій електроніці для створення нанорозмірних шаблонів на основі. Наноімпринтинг пропонує виняткові можливості роздільної здатності, дозволяючи виготовляти нанорозмірні елементи та структури. Створення пресформ зі складними наноструктурами може бути складним і дорогим [6]. Основні типи — термальний та УФ наноімпринтинг.

Методи осадження в друкованій електроніці стосуються процесів, які використовуються для нанесення тонких плівок або шарів матеріалів на основу для створення функціональних електронних компонентів. Серед таких методів — безелектричне осадження міді, термічне випаровування (фізичний метод осадження з парової фази), занурення [1, 38, 39].

У друкованій електроніці для з'єднання різних електронних компонентів або шарів для формування функціональних пристроїв використовуються механічні методи скріплення, такі як вбудування та зшивання. Вбудування в друкованій електроніці означає процес фізичного з'єднання різних електронних компонентів або шарів для створення повного електронного пристрою. Шиття в друкованій електроніці передбачає використання провідних ниток або дротів для створення електричних з'єднань між електронними компонентами [17, 22].

#### *Матеріали для чорнил для друкованої електроніки*

Чорнила відіграють вирішальну роль у сфері друкованої елек-



троніки, уможливаючи виготовлення різних електронних компонентів і пристроїв шляхом точного нанесення шаблонів функціональних матеріалів. Вибір відповідних матеріалів є важливим для досягнення бажаних електричних, механічних і оптичних властивостей друкованих електронних систем. Ці матеріали включають широкий спектр речовин, у тому числі металеві наночастинки, матеріали на основі вуглецю, діелектричні сполуки та ізоляційні полімери [1, 2]. Кожен тип матеріалу пропонує унікальні характеристики та функції, що дозволяє створювати провідні ланцюги, діелектричні шари та ізоляційні бар'єри.

Також варто зазначити, що хоча в західній літературі та джерелах в основному для опису друкувальних матеріалів використовується термін «inks», прямим перекладом якого є «чорнила», в українській термінології до більшості методів друку доцільніше використовувати термін «фарби», а «чорнила» використовувати для друкувальних матеріалів струминного друку.

Срібло широко використовується як матеріал для чорнила в галузі гнучкої електроніки завдяки своїй чудовій електропровідності. Срібло може бути застосоване для провідних чорнил, якими можна друкувати або наносити на гнучкі основи, дозволяючи створювати гнучкі схеми та електронні компоненти. Чорнила забезпечують високу провідність, хорошу адгезію до різних основ і сумісність із методами друку, що робить їх популярним вибором для гнучких електронних при-

строїв, таких як гнучкі дисплеї, датчики, мітки RFID і переносні пристрої [1, 7, 10].

Серед багатьох типів чорнила з наночастинками, виготовлених із таких металів, як мідь (Cu) [1] або золото (Au) [1, 22], чорнило з наночастинок срібла широко використовується для друку струмопровідних доріжок на папері через його відносно низьке затвердіння, температуру (спікання) і високу електропровідність [1]. Однак, також варто зазначити, що як чорнила на основі наночастинок срібла, так і оксиду міді сумісні зі струминним друком [13].

Наприклад, прозорий провідний целолюозний папір з покращеними механічними властивостями та стійкістю до хімічної корозії розроблено шляхом змішування окисленої нанокристалічної целюлози, хітозану та нанодротів зі срібла (Ag NW) [13].

Крім того, розроблено лінії передачі на текстильній основі з використанням нержавіючої сталі та посріблених провідних ниток, які вставлені між двома шарами поліефірної тканини, без будь-якої хвилястості по прямій лінії за допомогою ультразвукового впливу. Результати показують, що нитки з нержавіючої сталі пошкодились від зміни провідності. Виявилось, що посріблені нитки менш придатні для технології ультразвукового зварювання. Проте посріблені нитки з високою лінійною щільністю показали задовільні результати при помірних умовах роботи [39].

Чорнила на основі міді широко використовуються в галузі гнучкої електроніки завдяки своїй чудовій електропровідності та





економічній ефективності. Ці чорнила дозволяють друкувати гнучкі мідні схеми та з'єднувальні елементи, що дозволяє створювати легкі та гнучкі електронні пристрої. Мідні чорнила пропонують життєздатну альтернативу традиційним методам нанесення міді, пропонуючи покращену гнучкість, зменшені відходи матеріалу та сумісність з різними матеріалами основи [1, 12, 39].

Вуглецеві матеріали, такі як вуглецеві нанотрубки та графен, відіграють значну роль у розробці чорнила для гнучкої електроніки. Ці матеріали пропонують чудову електропровідність, механічну гнучкість і велику площу поверхні, що робить їх ідеальними для друку гнучких схем і пристроїв. Чорнила на основі вуглецю дозволяють виготовляти легку, гнучку та розтяжну електроніку, відкриваючи можливості для таких застосувань як гнучкі дисплеї, переносні датчики та накопичувачі енергії в галузі гнучкої електроніки [2, 13, 28].

У літературі повідомляється про різні друковані датчики, наприклад, газові датчики на основі вуглецевих нанотрубок (CNT) [2], PEDOT:PSS датчики вологості [8]. PEDOT/PSS в якості провідного матеріалу використовується для сенсорних елементів, і моделюється за допомогою спеціальних програм, щоб взаємодіяти з іншими функціональними елементами (наприклад, польовими транзисторами) [20].

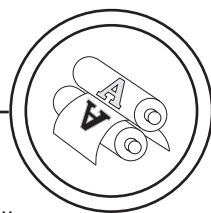
Зазначені матеріали також сумісні зі струминним друком [13]. Графен [28] і MXenes [14, 27, 40–42], викликають інтенсивний дослідницький інтерес завдяки

їх дедалі більш легкому та масштабованому виробництву, високій електропровідності та сумісності з існуючими технологіями виробництва.

Також увагу привертає використання графіту у суміші з глиною в якості провідного матеріалу. Можна легко, швидко та без розчинників створювати на папері олівцем графітові схеми та електроди. Ці графітні доріжки є механічно міцними, легкими, екологічно чистими та стійкими до хімічної корозії, тепла та радіації [13, 43–46]. Отримані гібридні пористі графітно-паперові волокнисті структури можуть працювати як пасивні провідні електроди та активні чутливі матеріали. Їх провідність в основному залежить від вмісту графіту, шорсткості паперу та параметрів малюнка.

Півпровідникові фарби відіграють вирішальну роль у друкованій електроніці, оскільки вони дозволяють виготовляти електронні компоненти та пристрої на різних основах. Основними групами є півпровідники на основі кремнію (полікристалічний кремній, монокристалічний кремній, карбід кремнію MOSFET) та інші півпровідникові основи (чорний фосфор; діхалькогеніди перехідних металів; оксид індію, легований оловом; MoS<sub>2</sub>; WS<sub>2</sub>). Вибір між півпровідниками на основі кремнію та іншими півпровідниковими матеріалами залежить від конкретних вимог застосування [12, 27, 47–49].

Діелектрики є важливими компонентами друкованої електроніки, а також ізоляційними матеріалами, які електрично розділяють провідні елементи. Викорис-



тання цих діелектричних чорнил у друкованій електроніці дає кілька переваг, одна з яких — діелектричні чорнила запобігають проходженню електричного струму між сусідніми провідними елементами, забезпечуючи ізоляцію та належне функціонування електронних компонентів. Однак є деякі міркування щодо використання діелектричних чорнил у друкованій електроніці, а саме сумісність: діелектричні чорнила мають бути сумісні з вибраним методом друку та матеріалом основи, щоб забезпечити належну адгезію та ефективність [2, 50–53].

Композитні чорнила є важливою категорією чорнил, що використовуються в галузі друкованої електроніки, пропонуючи універсальний та індивідуальний підхід для задоволення конкретних вимог застосування. Переваги композитних чорнил полягають у їх здатності адаптувати властивості кінцевої друкованої електроніки. Однак використання композитних чорнил також створює деякі проблеми [22, 54–57].

Рідко використовуються різні основи чорнила через специфічні вимоги застосування. Таким чином, використання різних типів чорнила, таких як MXenes, h-BN, C60, Au, Cr, Al і ZnO, дозволяє виготовляти широкий спектр електронних пристроїв як для гнучкої, так і для негнучкої електроніки. Кожен чорнильний матеріал має унікальні властивості, які можна пристосувати до конкретних застосувань, що сприяє безперервному розвитку галузі друкованої електроніки та її різноманітних практичних реалізацій [22, 27, 58–60].

### Мета роботи

Оцінка існуючих досліджень з використання різних матеріалів в якості основи як гнучкої, так і негнучкої. Аналіз застосувань методів друку для друкованої електроніки та матеріалів в якості бази для струмопровідних чорнил/фарб. Розробка класифікацій основ, матеріалів для чорнил/фарб, методів друку, визначення основних застосувань.

### Результати проведених досліджень

Проведено аналіз літературних джерел та розроблено комплексну систему класифікації способів нанесення елементів електроніки та основ у сфері друкованої електроніки.

За результатом аналізу галузі, основні положення за матеріалами основ узагальнено за допомогою відповідної класифікації (рис. 1).

Кожен із методів друку, що застосовується для друкованої електроніки має свої переваги та обмеження, а вибір методу друку залежить від конкретного виробу та вимог. Методи друку, які застосовуються при виготовленні друкованої електроніки узагальнено у виді класифікації на рис. 2.

Різні основи для чорнила застосовуються відповідно до вимог до функцій виробу. Основи для чорнила, що зазвичай використовуються для друкованої електроніки узагальнені в класифікації на рис. 3.

### Висновки

У статті висвітлюються основні методи друку, які використовуються в друкованій електроніці, а також відповідні основи для

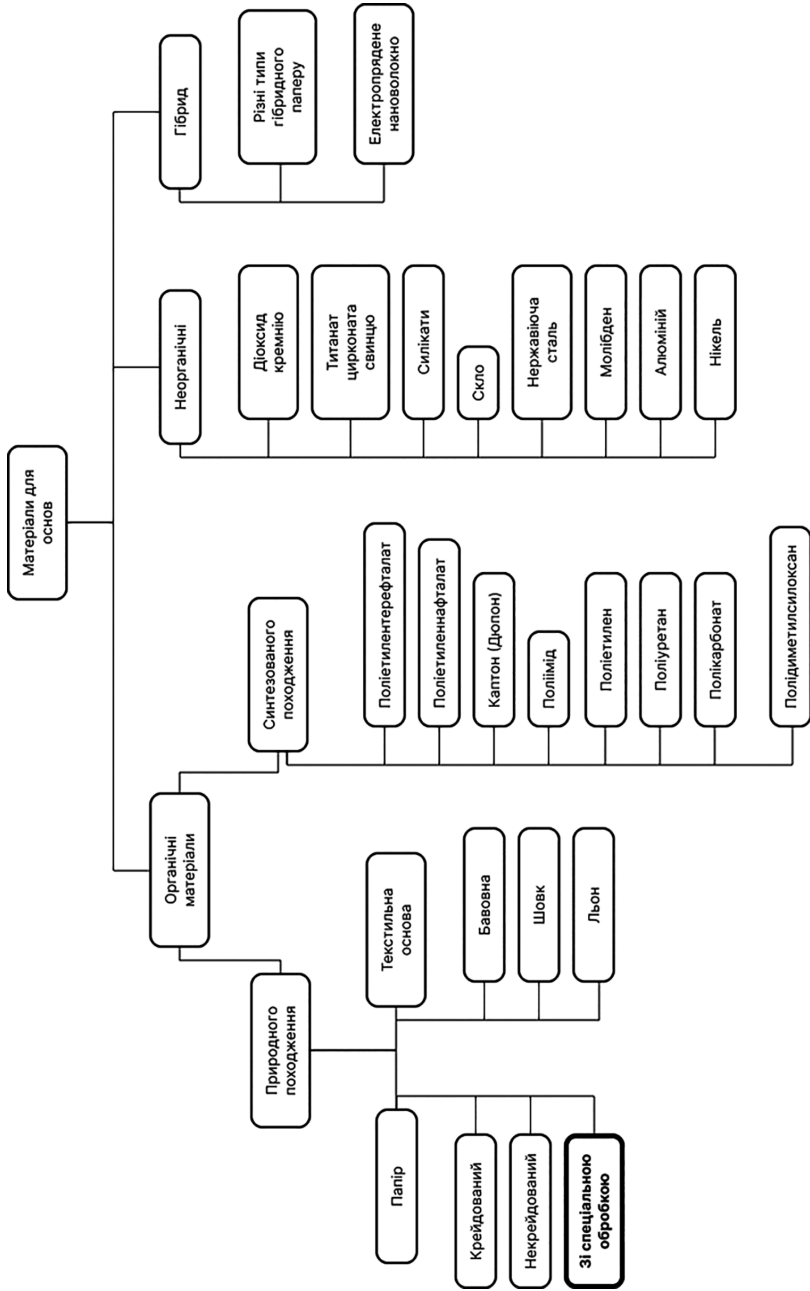
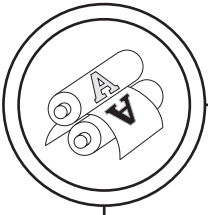


Рис. 1. Класифікація основ для друкованої електроніки

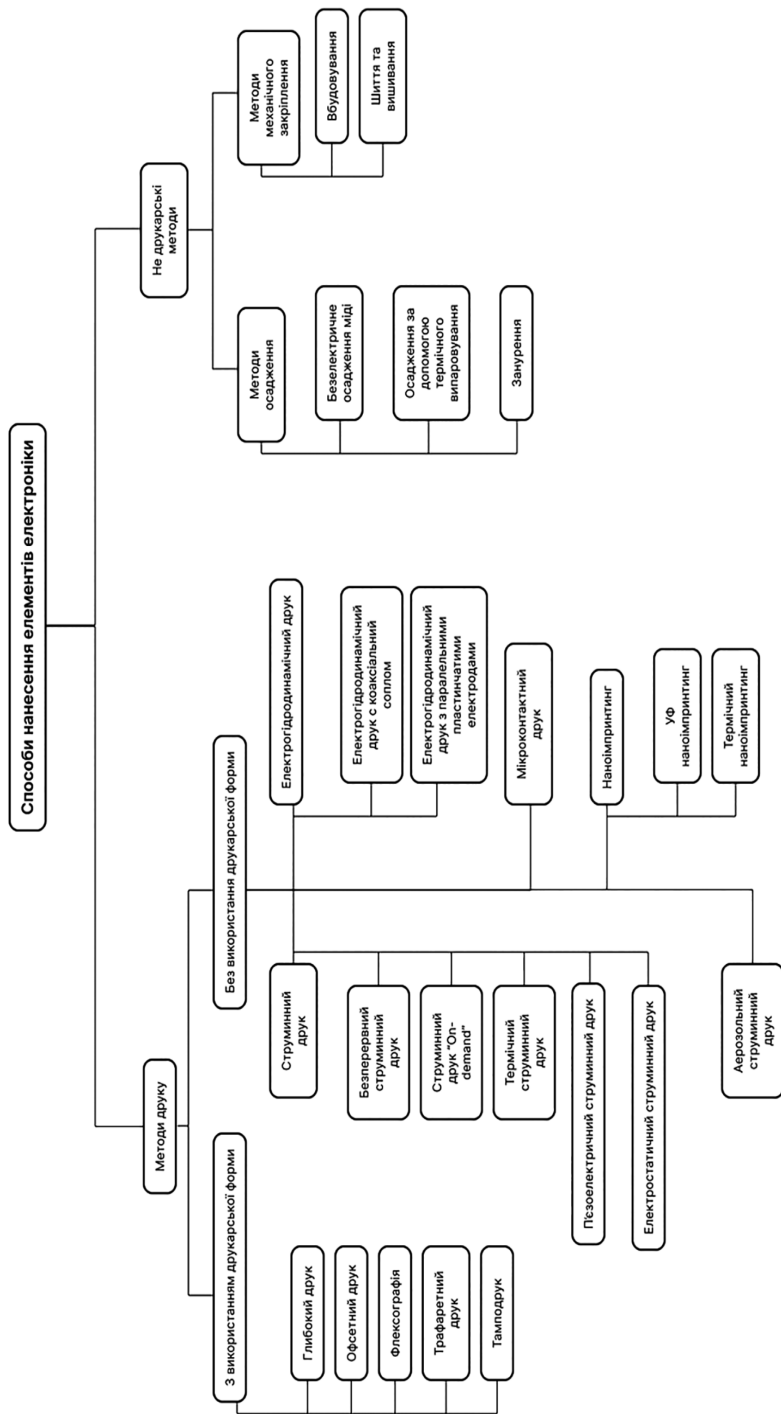
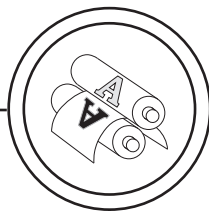


Рис. 2. Способи нанесення елементів електроніки

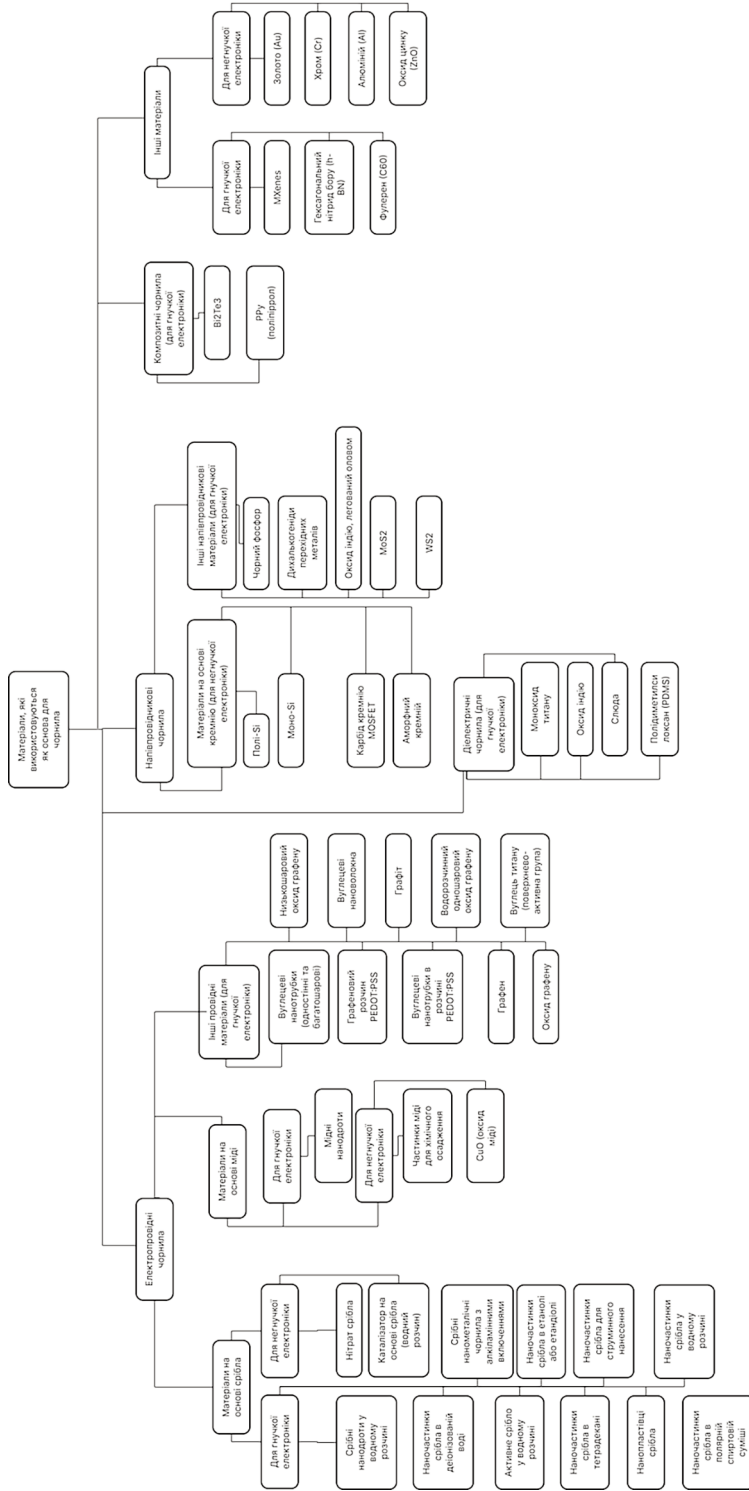
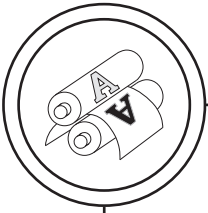
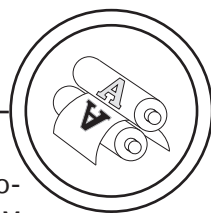


Рис. 3. Матеріали для друкувальних матеріалів (фарб/чорнил) для друкованої електроніки



кожного методу. Трафаретний друк стає найпоширенішим і економічно ефективним методом, при цьому скло, поліестер і поліетилентерефталат (ПЕТ) є широко використовуваними основами. Струминний друк відомий своєю високою роздільною здатністю та універсальністю, часто використовується з такими матеріалами, як папір, пластик і металева фольга. Флексографічний друк пропонує високошвидкісний друк на таких матеріалах як папір, картон і пластикові плівки. Глибокий друк, відомий своїми можливостями високої роздільної здатності, зазвичай використовується на таких основах як папір, пластикові плівки та металева фольга.

Все наведене дозволяє зробити висновок, що використання паперу як основи в друкованій електроніці, особливо з нанесенням спеціальних покриттів пропонує кілька ключових переваг, включаючи екологічну та економічну ефективність і широку доступність. Таким чином, використання паперу зі спеціальним покриттям стає перспективним вибором, узгоджуючи принципи стійкості, економічності та практичності, що робить його переконливим варіантом для різноманітних застосувань друкованої електроніки.

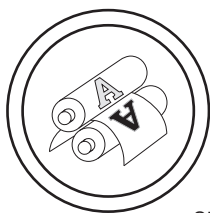
Важливо, що вибір фарбової/чорнильної основи, наприклад срібної, мідної, вуглецевої та інших,

повинен бути продумано узгоджений з відповідним методом друку, будь то глибокий, офсетний друк, флексографія чи інші техніки. Адаптованість різних основ фарби/чорнила до конкретних методів друку та основ є критично важливим моментом для досягнення оптимальних результатів. Наприклад, провідність фарб/чорнила на основі срібла робить їх особливо придатними для струминного друку на паперових підкладках, тоді як чорнила на основі міді сумісні з флексографічним друком на пластикових матеріалах. Подібним чином фарби/чорнила на основі вуглецю пропонують універсальність у кількох методах, включаючи трафаретний друк на тканинних основах. Ця мережа взаємозв'язків підкреслює необхідність обґрунтованого процесу вибору, який узгоджує основу фарби/чорнила, метод друку та основу для друкування для забезпечення бажаної продуктивності та довговічності електронного пристрою.

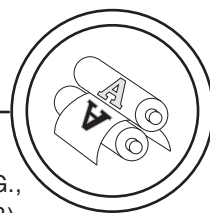
Розмаїття призначень і видів виробів друкованої електроніки ставить завдання вибору раціонального методу нанесення елементів, чи, можливо, використання комбінованих/гібридних технологій на різних етапах створення виробу друкованої електроніки. Таке обґрунтування буде методом подальших досліджень.

#### Список використаної літератури/References

1. Kim, S. (2020). Inkjet-Printed Electronics on Paper for RF Identification (RFID) and Sensing. *Electronics*, 9(10):1636. <https://doi.org/10.3390/electronics9101636>.
2. Wiklund, J., Karakoç, A., Palko, T., Yiğitler, H., Ruttik, K., Jäntti, R., & Paltakari, J. (2021). A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3):89. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030089>.



3. 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.
4. Perelaer, J., Smith, P. J., Mager, D., Soltman, D., Volkman, S. K., Subramanian, V., & Schubert, U. S. (2010). Printed electronics: The challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry*, 20(39), 8446–8453. doi:10.1039/c0jm00264j.
5. 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.
6. 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.
7. Kang DJ, González-García L., & Kraus, T. (2022). Soft electronics by inkjet printing metal inks on porous substrates. *Flex Print Electron*, 7(3).
8. Krajewski, A. S., Magniez, K., Helmer, R. J. N., & Schrank, V. (2013). Piezoelectric force response of novel 2d textile based pvdof sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(12), 4743–4748. doi:10.1109/JSEN.2013.2274151.
9. Fumeaux, N., & Briand, D. (2023). Zinc hybrid sintering for printed transient sensors and wireless electronics. *Npj Flexible Electronics*, 7(1). doi:10.1038/s41528-023-00249-0.
10. Yamada, T. et al. (2016). Nanoparticle chemisorption printing technique for conductive silver patterning with submicron resolution. *Nat. Commun*, 7:11402. doi: 10.1038/ncomms11402.
11. Gomes, P., Tama, D., Yao, Y., Abreu, M. J., Souto, A. P., & Carvalho, H. (2018). Development of pressure sensors for smart textiles. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 460(1). doi:10.1088/1757-899X/460/1/012024. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
12. Cole, P., Turner, L., Hu, Z., & Ranasinghe, D. (2011). The Next Generation of RFID Technology. In D. C. Ranasinghe, Q. Z. Sheng, & S. Zeadally (Eds.), *Unique Radio Innovation for the 21st Century: Building Scalable and Global RFID Networks* (pp. 3–23). *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03462-6>.
13. 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.
14. Aassime, A., & Hamouda, F. (2017). Conventional and Un-Conventional Lithography for Fabricating Thin Film Functional Devices. In N. N. Nikitenkov (Ed.), *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings* (pp. 43–58). *InTech*. doi: 10.5772/66028.
15. Anas, K. (2020, June 15). Integrated Circuits Fabrication and their Technologies. *IEEE AIET SB*. Retrieved from <https://edu.ieee.org/eg-aiet/integrated-circuits-ic-technologies>.
16. 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.



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

18. 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.

19. Harvey, J. E. (2003–2004). Printing Electronics. *Media4theWorld*, LLC.

20. 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>.

21. Schmidt, W., & Barth-Gremmel, K. (2012, September 20). Support for Electronic Circuits [Patent Application No. US2012234585A1; PCT Filed: September 9, 2010]. *European Patent Office*. Retrieved from [https://world-wide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=2012234585A1&KC=A1&FT=D&ND=4&date=20120920&DB=EPODOC&locale=en\\_EP](https://world-wide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=2012234585A1&KC=A1&FT=D&ND=4&date=20120920&DB=EPODOC&locale=en_EP).

22. 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.

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

24. 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. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

25. 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. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

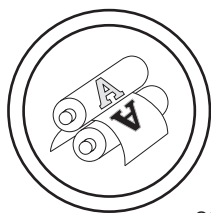
26. Tai, T. S., He, S., & Ghazinouri, B. (2023). 2D FPCB micromirror for scanning LIDAR. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 33(12). doi:10.1088/1361-6439/ac9e62.

27. 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.

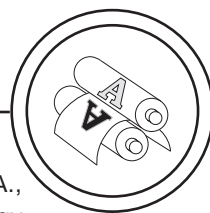
28. Orts, V., Chan, K. C., Caironi, M., Athanassiou, A., Kinloch, I. A., Bissett, M., & Cataldi, P. (2022). Electrically Conductive 2D Material Coatings for Flexible and Stretchable Electronics: A Comparative Review of Graphenes and MXenes. *Adv. Funct. Mater.*, 32, 2204772. <https://doi.org/10.1002/adfm.202204772>.

29. 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. *Proceedings of SMTA International*, 246–252. Presented at Rosemont, IL, USA, September 25–29.





30. Tekin, E., Smith, P. J., & Schubert, U. S. (2008). Inkjet printing as a deposition and patterning tool for polymers and inorganic particles. *Soft Matter*, 4(4), 703–713. doi:10.1039/b711984d.
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. Monroe, M. M., Villanueva, L. G., & Briand, D. (2023). Low-temperature processing of screen-printed piezoelectric KNbO<sub>3</sub> with integration onto biodegradable paper substrates. *Microsystems and Nanoengineering*, 9(1). doi:10.1038/s41378-023-00489-0.
33. Brito-Pereira, R., Pereira, N., Ribeiro, C., Lanceros-Mendez, S., & Martins, P. (2023). Environmentally friendlier wireless energy power systems: The coil on a paper approach. *Nano Energy*, 111. doi:10.1016/j.nanoen.2023.108391.
34. Brooke, R., Edberg, J., Petsagkourakis, I., Freitag, K., Mulla, M. Y., Nilsson, M., & Andersson Ersman, P. (2023). Paper electronics utilizing screen printing and vapor phase polymerization. *Advanced Sustainable Systems*. doi:10.1002/adsu.202300058.
35. Fang, Y., Mo, L., Xin, Z., Chen, Y., Li, X., Li, Y., & Li, L. (2022). Research on printed conductive silver layer based on inkjet photo paper. *Journal of Imaging Science and Technology*, 66(2). doi:10.2352/J.ImagingSci.Technol.2022.66.2.020407.
36. Lee, T., Shin, D., Kim, Y., Kim, C. H., Jo, J., & Kim, D. (2007). Printed EL on flexible paper substrate. *Paper presented at the AD'07 – Proceedings of Asia Display 2007*, 1, 888–893. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
37. Liu, J., Yang, C., Wu, H., Lin, Z., Zhang, Z., Wang, R., Li, B., Kang, F., Shi, L., & Wong, C.P. (2014). Future Paper based Printed Circuit Boards for Green Electronics: Fabrication and Life Cycle Assessment. *Energy and Environmental Science*, 7 (11), 3674–3682. doi:10.1039/C4EE01995D.
38. 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.
39. Wang, X., Zhu, M., Li, X., Qin, Z., Lu, G., Zhao, J., & Zhang, Z. (2022). Ultralow-Power and Radiation-Tolerant Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Electronics Utilizing Enhancement-Mode Carbon Nanotube Transistors on Paper Substrates. *Adv. Mater.*, 34, 2204066. <https://doi.org/10.1002/adma.202204066>.
40. 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.
41. Kelly, A. G., Finn, D., Harvey, A., Hallam, T., & Coleman, J. N. (2016). All-printed capacitors from graphene-BN-graphene nanosheet heterostructures. *Applied Physics Letters*, 109(2). doi:10.1063/1.4958858.
42. Martins, R., Nathan, A., Barros, R., Pereira, L., Barquinha, P., Correia, N., & Fortunato, E. (2011). Complementary metal oxide semiconductor technology with and on paper. *Advanced Materials*, 23(39), 4491–4496. doi:10.1002/adma.201102232.



43. Reuss, R. H., Chalamala, B. R., Moussessian, A., Kane, M. G., Kumar, A., Zhang, D. C., & Snow, E. (2005). Macroelectronics: Perspectives on technology and applications. *Proceedings of the IEEE*, 93(7), 1239–1256. doi:10.1109/JPROC.2005.851237.

44. Jansson, E., Lyytikäinen, J., Tanninen, P., Eiroma, K., Leminen, V., Immonen, K., & Hakola, L. (2022). Suitability of Paper-Based Substrates for Printed Electronics. *Materials*, 15, 957. <https://doi.org/10.3390/ma15030957>.

45. Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49–69. doi:10.1007/s11277-011-0288-5.

46. Ruiz-Preciado, L. A., Baek, S., Strobel, N., Xia, K., Seiberlich, M., Park, S., & Hernandez-Sosa, G. (2023). Monolithically printed all-organic flexible photo-sensor active matrix. *Npj Flexible Electronics*, 7(1). doi:10.1038/s41528-023-00242-7.

47. Dimitrakopoulos, C. D., & Malenfant, P. R. L. (2002). Organic thin film transistors for large area electronics. *Advanced Materials*, 14(2), 99–117. doi:10.1002/1521-4095(20020116)14:2<99::AID-ADMA99>3.0.CO;2-9.

48. Martins, R., Ferreira, I., & Fortunato, E. (2011). Electronics with and on paper. *Physica Status Solidi – Rapid Research Letters*, 5(9), 332–335. doi:10.1002/pssr.201105247.

49. Jain, K., Klosner, M., Zemel, M., & Raghunandan, S. (2005). Flexible electronics and displays: High-resolution, roll-to-roll, projection lithography and photoablation processing technologies for high-throughput production. *Proceedings of the IEEE*, 93(8), 1500–1510. doi:10.1109/JPROC.2005.851505.

50. Vega-Colado, C., Arredondo, B., Torres, J. C., López-Fraguas, E., Vergaz, R., Martín-Martín, D., & Sánchez-Pena, J. M. (2018). An all-organic flexible visible light communication system. *Sensors (Switzerland)*, 18(9). doi:10.3390/s18093045.

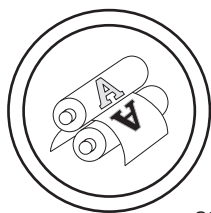
51. Casula, G., Cosseddu, P., & Bonfiglio, A. (2015). Integration of an organic resistive memory with a pressure-sensitive element on a fully flexible substrate. *Advanced Electronic Materials*, 1(12). doi:10.1002/aelm.201500234.

52. Jandow, N.N., Bakr, N., & Habubi, N. (2013). Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited on Poly Propylene Carbonate (PPC) Plastic Substrates by RF Magnetron Sputtering. *Proceedings of 20th Scientific Conference of College of Education*, Vol. 4, 626–633. doi: 10.13140/2.1.3090.5929.

53. Finn, D. J., Lotya, M., Cunningham, G., Smith, R. J., McCloskey, D., Donegan, J. F., & Coleman, J. N. (2014). Inkjet deposition of liquid-exfoliated graphene and MoS<sub>2</sub> nanosheets for printed device applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(5), 925–932. doi:10.1039/c3tc31993h.

54. Podsiadły, B., Walter, P., Kamiński, M., Skalski, A., & Słoma, M. (2022). Electrically conductive nanocomposite fibers for flexible and structural electronics. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3). doi:10.3390/app12030941.

55. Chamarti, A., Mohammad, W., Ramiseti, S., Vemarigi, J., Dandgey, U., & Varahramyan, K. (2005). A low cost flexible-substrate wireless sensor tag based on sensor switch element. *Paper presented at the Proceedings – Electronic Components and Technology Conference*, 1, 523–527. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com).



56. 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.

57. Klauk, H., Zschieschang, U., Pflaum, J., & Halik, M. (2007). Ultralow-power organic complementary circuits. *Nature*, 445(7129), 745–748. doi:10.1038/nature05533.

58. Kuusipalo, J., Savijärvi, A., Norval, S., Adlen, M. J., & Mackerron, D. H. (2004). The dependence of tear behaviour on the microstructure of biaxially drawn polyester film. *Journal of Materials Science*, 39(23), 6909–6919. doi:10.1023/B:JMSE.0000047532.34562.bc.

59. Ferrari, A. C., Bonaccorso, F., Fal'ko, V., Novoselov, K. S., Roche, S., Bøggild, P., & Kinaret, J. (2015). Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale*, 7(11), 4598–4810. doi:10.1039/c4nr01600a.

60. Barras, R., Cunha, I., Gaspar, D., Fortunato, E., Martins, R., & Pereira, L. (2017). *Flexible Printed Electron*, 2, 014006.

**This paper presents a comprehensive structural classification of printing methods and substrates in the field of printed electronics. Through an extensive literature review, various printing methods and substrates have been analyzed and classified based on their characteristics and applications. The systematic classification provides researchers, practitioners, and industry professionals with a structured overview of the available printing methods and substrates in the field of printed electronics. The results and conclusions of this study offer recommendations for the selection and use of printing methods and substrates in the manufacture of electronic devices.**

**Keywords: printed electronics; printing methods; substrate roughness; surface profile; flexographic printing; screen printing; inkjet printing; conductive inks; flexible substrates; printed material.**

Надійшла до редакції 02.12.23