



Л. К. Гліненко, В. М. Фаст

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Здійснено ґрунтовний аналіз традиційних технологій виготовлення електронних плат, які забезпечують стабільно належну якість продукції, але водночас не відповідають зростаючим вимогам сучасного виробництва з позицій сталого розвитку, екологічної безпеки, ресурсозбереження, швидкості створення прототипів. З'ясовано, що актуальним напрямом удосконалення технологій є впровадження адитивного 3D-друку, які дадуть змогу значно скоротити кількість відходів, зменшити споживання матеріалів, автоматизувати виробничі процеси та підвищити гнучкість виготовлення електронних плат. Проаналізовано численні публікації, що висвітлюють використання 3D друку в електронній промисловості, та встановлено, що більшість із них містять неповні або рекламно спрямовані відомості, що не дають змоги здійснити об'єктивне оцінювання ефективності та функціональних обмежень відповідних технологій. У процесі дослідження виокремлено п'ять ключових технологій, придатних для виготовлення електронних плат: струменеве нанесення матеріалів, струменеве нанесення наночастинок, аерозольно-струменевий друк, мультифункційне нанесення чорнила, безперервне осадження за допомогою лазера та пошарове ламінування матеріалів. Встановлено перелік характеристик, які відображають як параметри остаточного продукту, так і особливості виробничого процесу, включно з його технологічною складністю, вартісними чинниками, надійністю і масштабованістю. Запропоновано методику оцінювання зазначених характеристик за 10-бальною шкалою, що забезпечує кількісне порівняння альтернативних технологій. Розроблено параметризовані моделі процесів адитивного виготовлення електронних плат у вигляді карт властивостей, які дають змогу здійснювати швидкий відбір технологій, найпридатніших до конкретних вимог до виробництва. Запропоновані моделі можна застосовувати для обґрунтованого прийняття рішень щодо впровадження технологій 3D-друку в різних галузях промисловості, включно з високоточною електронікою, автоматизованими системами керування, виробництвом сенсорних пристроїв та прототипуванням інноваційних рішень.

Ключові слова: карти Пайтця; полярні діаграми властивостей; технологія 3D друку; адитивний метод; прототипування; провідне чорнило.

Вступ / Introduction

Друкована плата (ДП) є основною конструкційною одиницею довільного електронного пристрою, яка забезпечує механічне об'єднання електронних компонентів та встановлення електричних зв'язків між ними. Традиційно друковані плати виготовляють за субтрактивною технологією, базовим процесом якої є селективне хімічне видалення зайвої мідної фольги з діелектричної основи для створення потрібної конфігурації провідників. Посилення вимог до матеріаломісткості та екологічності виробничих процесів сукупно з потребою у мініатюризації компонентів друкованих плат привели до витіснення традиційних субтрактивних методів адитивними технологіями 3D-друку, які дають змогу з легкістю реалізовувати складні електронні вироб, створюючи електричні з'єднання компонентів безпосередньо на діелектричній основі.

Згідно з останнім звітом Wohlers [60], ринок товарів і послуг адитивного виробництва за 2022 р. зріс приблизно на 18,3 %, за 2023 р. – на 11 %, вперше перетнувши обсяг 20 млрд дол., з випереджальними темпами

зростання ринку процесів, що використовують метал і кераміку; обсяг поставок 3D принтерів збільшився на 24,4 %. За даними роботи [33], ринок адитивної друкованої електроніки за 2021-2023 рр. зростав щороку на 18 %, а у виробництві друкованої електроніки до 2030 р. прогнозують зростання на 22,3 % щороку [20]. За звітом AMPOWER [2], ринок адитивного виробництва металів нині становить понад 10,5 млрд дол. США з прогнозованим річним зростанням упродовж 2024-2028 рр. у 13,9 % на рік, що забезпечить у 2028 р. досягнення обсягу ринку у 20 млрд доларів. Стрімкий розвиток новітніх адитивних технологій і сфер їх застосування зумовлює актуальність аналізу їх можливостей, перспектив і доцільності використання.

Однією з найперспективніших сфер застосування адитивних технологій є їх впровадження у виробництво друкованих плат. Технології 3D-друку електронних плат розглянуто у багатьох дослідженнях, проте вони здебільшого зосереджені на вдосконаленні режимів окремих різновидів адитивних процесів, застосовуваному обладнанні і матеріалах, а також на параметрах друкованих плат, яких досягають у конкретному виробничо-

Інформація про авторів:

Гліненко Лариса Костянтинівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

Email: larysa.k.hlinenko@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3105-4568>

Фаст Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доцент, кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

Email: volodymyr.m.fast@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-0772-5592>

Цитування за ДСТУ: Гліненко Л. К., Фаст В. М. Обґрунтування вибору технології 3D-друку електронних модулів. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 3. С. 75–87.

Citation APA: Hlinenko, L. K., & Fast, V. M. (2025). Justification for the choice of 3D printing technology of electronic modules. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(3), 75–87. <https://doi.org/10.36930/40350308>

му процесі. Як наслідок, вибір конкретного технологічного процесу для впровадження у виробництво друкованих плат за заданими вимогами та обмеженнями здійснюють розробники на підставі власного досвіду чи знайомства з певною частиною результатів щодо окремих, але не всіх, технологічних процесів, що робить завдання знаходження способу обґрунтування цього вибору актуальною проблемою.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виготовлення плат для електронних модулів.

Предмет дослідження – методи і засоби вибору технології 3D-друку електронних плат, що дасть змогу значно скоротити кількість відходів, зменшити споживання матеріалів, автоматизувати виробничі процеси та підвищити гнучкість виробництва.

Мета роботи – удосконалити процедуру вибору технології виготовлення 3D-друкованих плат як основу апаратного забезпечення ІТ, що дасть змогу виділити технологічні процеси, практично придатні для їх промислового виробництва.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати ключові параметри відомих адитивних технологій порівняно з параметрами сучасних друкованих плат, що дасть змогу виділити процеси, теоретично придатні для їх виготовлення для потреб електронних засобів інформаційних технологій;
- проаналізувати рівень зрілості виділених технологій виготовлення електронних плат, що дасть змогу оцінити їх перспективність для практичного використання у виробництві друкованих плат;
- визначити набір ключових параметрів відібраних процесів, здатних забезпечити їх порівняння та обґрунтований вибір оптимального процесу для конкретного проекту;
- розробити методику візуалізації результатів порівняння процесів, що сприятиме спрощенню процедури оптимального вибору технологічного процесу виготовлення електронних плат.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Опис окремих технологій 3D друку та отриманих за їх допомогою виробів у галузі електроніки наведено в численних публікаціях у паперових та електронних джерелах, зокрема у працях Дж. Хоебера зі співавторами [24], І. Фідана зі співавторами [19], Нго Т. зі співавторами [36], Х. Зенга зі співавторами [66], М. Ренна зі співавторами [49], Б. Дермека зі співавторами [11], Х. Салеха зі співавторами [51, 50], М. Сейті зі співавторами [52, 53], С. Рао зі співавторами [47] та багатьох публікаціях в Інтернеті як аналітичного [18, 27] чи довідникового [10, 11], так і рекламного характеру, наприклад, [18, 36, 54] та багатьох інших.

Зокрема, у роботі [12] наведено детальний аналіз варіантів реалізації технології LOM (англ. *Laminated Object Manufacturing* – виготовлення ламінованих виробів), на численних прикладах доводять економічну ефективність та вигреш у тривалості виробничого процесу для швидкого виготовлення деталей розміром від міліметра до метра, з одночасним урахуванням особливостей конструкцій. Показано, що процес забезпечує отримання кераміки з унікальними властивостями, що потребують матеріалів, які поєднують належну термостійкість, механічну міцність і легку вагу. Автори також детально оцінюють застосовність LOM у формуванні матеріалів на підставі кераміки зі структурою, близькою до сітчастої, а також пропонують варіанти зміни пара-

метрів процесу та конфігурацій обладнання, що можуть покращити економічну доцільність її експлуатації.

У роботі [19] представлено стислий огляд еволюції та останніх досягнень у галузі адитивного виробництва (AB), окреслено фактори, що впливають на розроблення і комерціалізацію винаходів у цій галузі, обговорено новітні матеріали і технології AB та їхню інтеграцію з новими технологіями. У документі досліджують вплив штучного інтелекту на різні сектори, починаючи з 1970-х років. У ньому також розглядають виклики і майбутні напрями, такі як гібридне виробництво і біодрук, а також соціально-економічні та екологічні наслідки. Автори на прикладах переконливо доводять, що постійний прогрес у матеріалах, технологіях і програмних засобах, впровадження інструментів штучного інтелекту прокладає шлях до майбутнього, в якому AM стане невід'ємною частиною різних галузей промисловості, враховуючи аерокосмічну, автомобільну, медичну, ІТ, харчову та будівельну галузі, надаючи інноваційні рішення і забезпечуючи безпрецедентний рівень ефективності та кастомізації. Аналогічний огляд [36] зосереджено на найпопулярніших методах 3D-друку, їх перевагах та недоліках, аналізі стану розвитку матеріалів, враховуючи металеві сплави, полімерні композити, кераміку та бетон, а також на дослідженні основних проблем оброблення щодо якості отриманих шарів, пов'язаних з утворенням пор, анізотропною поведінкою, обмеженнями комп'ютерного проектування та пошаровою топологією.

У роботі [24] подано результати пошарового створення технології друкованого блоку комбінування процесу 3D-друку на підставі порошкового шару (PBF) для створення вбудованих електронних компонентів, процесів аерозольного струменевого друку ізотропного струмопровідного клею для формування провідних шляхів між ними та аерозольного струменевого друку зі застосуванням чорнила з наночастинками срібла для формування міжз'єднань між монтованими на поверхню SMD (англ. *Surface Mount Device*) елементами. За результатами експериментальних досліджень, специфіка використовуваних матеріалів та характеристики поверхні ускладнюють отримання друкованих структур з високою роздільною здатністю та дуже тонкими шарами. Водночас автори підтверджують, що використання цифрових технологій друку додатково відкриває нові можливості для створення повністю адитивного виробництва електронних компонентів зі скороченим технологічним циклом, що дає змогу прогнозувати зростання кількості досліджень у цій галузі.

У блозі компанії провідного китайського виробника друкованих плат ELE PCB регулярно публікують матеріали про сучасні процеси 3D-виробництва друкованих плат. Зокрема, у роботі [15] подано послідовність основних стадій цього процесу, розглянуто специфіку формування складових частин друкованих плат за різними процесами, наведено основні переваги та недоліки окремих процесів, серед яких виділено обмежену пропозицію обладнання та обмеження на розміри друкованих плат, які, проте, будуть, ймовірно, долати в найближчому майбутньому. У цій роботі також наведено таблицю, яка дає змогу порівняти придатність різних принтерів для виготовлення тих чи інших друкованих плат. У роботі [71] наведено рекомендації з вибору матеріалів для окремих компонентів друкованих плат.

Переваги адитивних методів зумовили інтенсивне впровадження цієї технології виготовлення електронних плат у різних галузях [19, 20, 25, 32, 36]. Окрім цього, адитивна технологія друкованих плат дає змогу використовувати матеріали, що витримують високі температури і вібрації, які часто трапляються в автомобільній, аерокосмічній та оборонній промисловостях. При цьому, питомий опір друкованих провідників близький до мідних, отриманих за допомогою субтрактивних методів. Його значення змінюється в межах $(1,62 \dots 2,2) \cdot 10^{-8}$ Ом·м [30] і залежить від субстанції (чорнило чи паста) і матеріалу наночастинок: мідь, срібло, золото. Переваги адитивних методів виготовлення електронних плат та широкий спектр їх застосувань спонукають виробників плат та інвесторів до активного їх впровадження, що актуалізує ідентифікацію їх придатності до застосування у тих чи інших виробничих процесах, а також їх ефективності залежно від умов виробництва та вимог до продукту з метою здійснення оптимального вибору технології.

Невирішені проблеми. Опис окремих технологій 3D-друку та отриманих за ними продуктів у галузі електроніки наведено у численних публікаціях, переважно в електронних джерелах. Проте наведені дані почасти мають рекламний характер, містять тільки окремі дані щодо техніко-експлуатаційних характеристик процесів і не дають змоги оцінити переваги та недоліки тої чи іншої технології для виготовлення електронних плат. Це зумовлює потребу детального аналізу параметрів зазначених процесів на предмет оцінювання можливості та перспективності їх застосування у виробництві друкованих плат, що робить доцільним проведення цього дослідження.

Матеріали та методи дослідження. Теоретичною базою проведеного дослідження слугували публікації щодо результатів досліджень етапів адитивного процесу виготовлення електричної схеми у вигляді 3D-друкованої плати [47, 48, 49], його оптимізації [60, 63, 67], матеріалів [27, 42, 66] для цього процесу, стандартів на ці процеси [4] та на параметри друкованих плат, досягнутих у процесах параметрів [10, 11, 27, 28, 29, 30], актуальні публікації у блогах фахівців та сайтах компаній – виробників друкованих плат [2, 20, 55], дані патентів, паспортів та рекламних проспектів щодо обладнання для цих процесів [21, 57, 61], а також окремі методики оптимального вибору технологічних процесів в інших галузях [22, 23]. Дослідження проводили методами системного, структурно-елементного аналізу зі застосуванням методу карт властивостей та методом експертних оцінок.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Згідно із стандартом 2/ASTM 52900:2021, всі технології формування різноманітних виробів з використанням 3D друку поділяють на такі категорії [4]:

- *material extrusion (MEX)* – вибіркова екструзія (витискання матеріалу) із сопла чи отвору;
- *material jetting (MJT)* – струменеве нанесення матеріалів способом вибіркового осадження крапель розприскуваного матеріалу;
- *binder jetting (BJT)* – струменеве нанесення зв'язувального матеріалу способом вибіркового нанесення рідкого зв'язувального реагента для з'єднання порошкових матеріалів методом розприскування

- *sheet lamination (SHL)* – листові ламінації (скріплення листових матеріалів);
- *vat photopolymerization (VPP)* – фотополімеризація у ванні;
- *powder bed fusion (PBF)* – "синтез на підкладці", який передбачає вибіркове плавлення матеріалу в заздалегідь сформованому шарі під дією теплової енергії (послідовне формування шарів порошкових будівельних матеріалів і вибіркове (селективне) спікання частинок будівельного матеріалу);
- *directed energy deposition (DED)* – пряме підведення енергії та матеріалів, за якого можливе сплавлення матеріалів способом плавлення під час їх осадження завдяки безпосередньому поданню сфокусованого потоку енергії чи пошарове формування виробу методом внесення будівельного матеріалу безпосередньо в місце підведення енергії.

Кожна з цих категорій 3D-друку, як основа технології формування електронних виробів, охоплює по декілька процесів, що відрізняються природою використовуваних матеріалів, джерелами та природою енергетичного потоку для генерації тепла, станом матеріалу в процесі плавлення, типом заготовки та фізикою процесу спікання тощо. Проте серед цього різноманіття технологічних процесів тільки декілька задовольняють вимоги до процесів виготовлення електронних плат.

Аналізуючи придатність адитивних методів для виготовлення електронних плат, варто також оцінити їх здатність забезпечити вимоги до параметрів друкованого рисунка (ширини і товщини провідників та зазорів), які за стандартом IPC-2226A для плат з найвищою роздільною здатністю HDI становлять:

- мінімальна ширина провідника – 0,075 мм;
- мінімальна ширина зазору між провідниками – 0,075 мм;
- товщина провідника – 18-70 мкм.

Аналіз технологій 3D-друку на придатність і перспективність для виготовлення електронних плат дав змогу виділити для подальшого дослідження п'ять технологій:

- технології струменевого нанесення наночастинок NPJ (англ. *Nano Particle Jetting*), розпилення аерозолів чи аерозольно-струменевого друку AJT (англ. *Aerosol Jet Technology*) та мультифункційного нанесення MFAM (англ. *Multi-Functional Additive Manufacturing*), які належать до категорії струменевого нанесення матеріалів MJT (англ. *Material Jetting*);
- технологію безперервного осадження за допомогою лазера C. L.A.D (англ. *Continuous Laser Assisted Deposition*), яка належить до процесів "синтезу на підкладці" PBF (англ. *Powder Bed Fusion*);
- технологію пошарового ламінування матеріалів LOM (англ. *Laminated Object Manufacturing*), яка є одним з базових процесів листової ламінації SHL (англ. *Sheet Lamination*).

Струменеве нанесення MJT. Усі технології струменевого нанесення матеріалів MJT (англ. *Material Jetting*) [4] передбачають створення продукту осадженням крапель матеріалу зі сфокусованого їх потоку. Принцип дії аналогічний до струменевих принтерів, але замість чорнила наносять той чи інший матеріал (віск, фотополімер, метал чи кераміку). Струменеві принтери забезпечують належну роздільну здатність, точність, відтворюваність процесу; оброблення після друку прості і нетривалі, не потребують використання агресивних хімічних речовин [17, 18].

Технологія струменевого нанесення наночастинок NPJ (англ. *NanoParticle Jetting*) [34]. Запатентована

компанією XJet технологія адитивного виробництва 3D-друку (NPJ™) [61]. Ця технологія дає змогу створювати деталі з новітньої технічної кераміки або металевих матеріалів пошарово, використовуючи підхід, подібний до струменевого друку на папері. Рідкі суспензії, що містять тверді наночастинки вибраних конструкційних і допоміжних матеріалів (металевих провідних чи діелектричних полімерних чорнил), з високою точністю впорскуються на потрібні ділянки робочої області через високоточні сопла друкувальної головки, забезпечуючи формування потрібної конфігурації з високою роздільною здатністю з використанням мінімально необхідної кількості сировини, що робить цю технологію безвідходною [31]. Процес реалізують у виробництві за допомогою наявного на ринку принтера XJet Carmel 1400 System [57, 68].

Технологія NPJ™ компанії XJet забезпечує такі конкурентні переваги, як [21, 26, 36, 37]:

- висока якість продукту;
- висока роздільна здатність отримуваної топології;
- висока гнучкість у виборі матеріалів і конфігурацій, що уможливило адитивне виробництво деталей з технічної кераміки та металів, що робить технологію придатною для застосування в таких галузях, як аерокосмічна промисловість, електротехніка, енергетика, медицина, автомобільна промисловість та багатьох інших сферах застосування;
- можливість створення прецизійних друкованих плат на керамічній основі шляхом пошарового виготовлення деталей із сучасної технічної кераміки поєднано з провідниковими чорнилами;
- можливість створення надтонких елементів деталей завдяки високоточним друкувальним головкам з тисячами струменевих сопел, які наносять мільйони дрібних крапель кераміки та допоміжних чорнил на конструкційний лоток надтонкими (10 мікрон) шарами;
- відсутність використання хімічно агресивних порошків, лазерів, мінімальність відходів, екологічна чистота та безпека виробництва.

Технологія розпилення аерозолів AJT (англ. *Aerosol Jet Technology*) [25, 43] базується на осадженні матеріалу із краплинок аерозолі, що подають у сфокусованому потоці інертного газу. Коли інертний газ (чистий сухий азот або стиснене повітря) і аерозоль проходять через профільовану насадку, вони пришвидшуються, і аерозоль "фокусується" у щільний потік крапель, що тече всередині інертного газу. Інертний газ також захищає сопло від контакту з матеріалом, запобігаючи його засміченню. Високошвидкісний потік частинок залишається сфокусованим під час проходження від сопла до підкладки на відстані від 2 до 5 мм, зберігаючи роздільну здатність на неоднорідних і тривимірних підкладках. Система керується даними стандартних САПР, які конвертуються у векторну траєкторію руху інструменту. Розміри друкованих елементів становлять від 10 мікрон до міліметрів [53].

Процес аерозольно-струменевого друку підтримує друк на різноманітних поверхнях, зокрема на пластику, кераміці та металевих конструкціях [52]. Комерційно доступні матеріали, такі як чорнила з наночастинками, були оптимізовані для процесу Aerosol Jet, щоб забезпечити друк (і подальше спікання чорнила) на пластикових підкладках [42].

Технологія Aerosol Jet дає змогу друкувати з'єднання як на 2D-, так і на 3D-підкладках, залучаючи широкий спектр провідникових і діелектричних матеріалів

[53]. Одночасне застосування кількох пристроїв введення чорнила може змінювати чи змішувати матеріали під час друку, що дає змогу у разі двовимірних виробів створювати багаторівневі з'єднання, друкуючи діелектричний матеріал у точках перетину електричних кіл, імітуючи в одному шарі багатошарову друковану плату [43, 64]. Процес дає змогу друкувати відповідні з'єднання на 3D-поверхнях, усуваючи потребу дрогового з'єднання (друк електричних з'єднань на 3D-шаблонах або виготовлення світлодіодних чипів). Ринкова пропозиція обладнання для Aerosol Jet складається з принтерів Aerosol Jet FLEX [37] та Aerosol Jet 4 [38] виробництва Optomec Company.

Технологія Aerosol Jet надає підтверджену у виробництві можливість здійснювати 3D-друк електронних компонентів, таких, як: резистори, конденсатори, антени, давачі та тонкоплівкові транзистори. Компоненти можна друкувати і на тривимірних поверхнях, що усуває потребу в окремій підкладці, зменшуючи цим самим розмір, товщину і вагу остаточного продукту. Зокрема, Aerosol Jet було застосовано для друку антен і давачів, які відповідають формі підкладки, наприклад, корпусу мобільного телефону [42]. Експлуатаційні параметри надрукованих компонентів, наприклад, значення опору резистора, можна контролювати за допомогою параметрів друку.

До переваг технології належать [5, 43, 47, 49]:

- суто цифровий друк за програмою, без масок або трафаретів, гальваніки або травлення;
- діапазон розмірів елементів від 10 мікрон до міліметрів;
- товщина друку від 100 нанометрів до 10 мікрон;
- можливість друку електричних компонентів і схем з комерційно доступних матеріалів;
- можливість друку на пластикових, керамічних та металевих підкладках;
- масштабованість підтримки вимог до великих обсягів виробництва.

Технологія багатофункційного нанесення MFAM (англ. *Multi-Functional Additive Manufacturing*) розроблено у Центрі адитивного виробництва CfAM (англ. *Centre of Additive Manufacturing*) Ноттінгемського університету (англ. *University of Nottingham*) у 2017 р. [51]. Цей метод є різновидом технології п'єзоелектричного крапельного нанесення матеріалу ПКНМ (англ. *Piezoelectric Inkjet*, PENJ) із групи методів струменевого нанесення типу DOD (англ. *Drop on Demand*), яка є базовою для одночасного друку різними матеріалами. Метод ПКНМ є найпопулярнішим методом друку електронних виробів через можливість застосування широкого діапазону матеріалів і відсутність особливих вимог до матеріалів. У цьому процесі п'єзоелектричні елементи під дією електричного імпульсу деформуються, створюючи пульсове коливання тиску у соплі, потрібне для виштовхування краплі. У традиційних методах ПКНМ затвердження осадженого матеріалу відбувається під дією інфрачервоного випромінювання, як, наприклад, у 3D-принтерах компаній NanoDimension та BotFactory.

Революційність технології MFAM полягає у використанні УФ-випромінювання для одночасного перетворення полімерних матеріалів, які здатні застигати під впливом УФ-випромінювання, і спікання струмопровідних матеріалів, що містять наночастинки срібла, під дією інтенсивного імпульсного УФ-випромінювання від ксенонових ламп, яке забезпечує фототермічний механізм дії [21, 51]. Це дає змогу виготовляти за один

цикл струменевого друку схеми, які містять електропровідні метали та ізоляційні полімерні чорнила, тобто здійснювати швидкий 3D-друк повнофункціональних електронних схем та компонентів, таких, як 3D-антени та друковані сенсори з різних матеріалів, враховуючи метали та пластмаси [38].

Поєднуючи створені 2D-друком електронні компоненти з адитивним виробництвом (AM) або 3D-друком на підставі пошарового осадження матеріалів та забезпечуючи друк кількох матеріалів в одному циклі адитивного виробництва, MFAM створює перспективи для подолання проблем застосування різних методів для затвердіння кожного матеріалу та виготовлення компонентів з ширшими функціональними можливостями. Процес має належну продуктивність: застигання одного шару чорнил триває менше хвилини завдяки ефективному поглинанню ультрафіолетового випромінювання наночастинками срібла у струмопровідних чорнилах з генерацією тепла, під дією якого наночастинки срібла плавляться, а розчинники струмопровідних чорнил випаровуються. Усі перетворення зосереджені у межах струмопровідних чорнил, що запобігає пошкодженню сусідніх друкованих полімерів.

Процес передбачає використання чорних струмопровідних металів та діелектричних полімерів. Виробнича реалізація технології можлива на принтері Stratasys Objet Connex3 260 компанії Stratasys [55].

Синтез на підкладці (PBF). У технології "синтезу на підкладці", чи плавлення порошкового шару PBF (англ. *Powder Bed Fusion*) укладання та плавлення порошкового матеріалу (металу чи пластику) з метою створення тривимірного виробу здійснюється завдяки тепловій енергії, генерованій лазерним або електронним променем від високоенергетичного джерела живлення. Під дією теплового потоку, що подається безпосередньо із джерела на певні ділянки порошкового шару, частинки об'єднуються в одне ціле. Коли утворюється один шар матеріалу потрібної конфігурації, на нього наноситься новий порошок, і процес починається знову, створюючи об'єкт шар за шаром. Сформовані шари застигають під час охолодження [25, 27].

Усі PBF-технології реалізують пошарове виготовлення виробів на підставі цифрової 3D-моделі, забезпечуючи спільні для всіх процесів переваги 3D-друку, такі як: кастомізація, економічність, скорочення тривалості складання та зменшення використання матеріалів. Однією з найважливіших переваг PBF-процесів над іншими процесами 3D-друку є те, що вони не потребують опорних конструкцій. Оскільки секції, такі як виступи, утримуються в потрібному положенні за рахунок порошкового матеріалу, що їх оточує, немає потреби в будь-якій опорній конструкції, щоб утримувати такі деталі. Це дає змогу спростити виробництво, оскільки після завершення робіт не потрібно демонтувати жодних опорних конструкцій. Ці переваги дали змогу PBF широко застосовуватися в комерційних цілях для виробництва нестандартних виробів зі складною геометрією в невеликих обсягах.

Різновидом таких технологій є технологія безперервного осадження за допомогою лазера C.L.A.D (англ. *Continuous Laser Assisted Deposition*), яку розробила компанія ioTech у 2016 році. Технологія C.L.A.D. є інноваційним методом 3D-друку з використанням декількох матеріалів, який дає змогу користувачам одночасно

обробляти різні текучі промислові сертифіковані матеріали (до шести сипучих матеріалів одночасно) з високою швидкістю [16]. У традиційних технологіях порошкового плавлення (PBF) порошковий матеріал (метал або пластик) розміщується і розплавляється для створення тривимірного продукту за допомогою тепла, що генерується лазером або електронним променем від високоенергетичного джерела живлення. У технології C.L.A.D. замість порошку використовують фольгу. Процес розпочинається з покриття підкладки фольгою з обраного вихідного матеріалу. Потім матеріал з фольги переноситься на підкладку під дією імпульсного лазерного випромінювання. Як покриття, так і впрорскування забезпечують роздільну здатність до 20 мікрон і безперервний моніторинг у замкнутому циклі. Далі 3D-друкована деталь проходить багатофункціональне вбудоване післяоброблення, яке охоплює ультрафіолетове та термічне затвердіння, а також лазерне спікання та абляцію, що дає змогу швидше виготовляти деталі в межах одного виробничого процесу [13, 29].

Процес дає змогу контролювати осадження кожної краплі матеріалу, водночас надаючи переваги високошвидкісного виробництва [29]. Завдяки гнучкості системи, технологія може бути використана в широкому діапазоні застосувань. Окрім корпусування напівпровідникових компонентів та виготовлення електронних плат, вона може використовуватися для поверхневого монтажу (SMT), дозування клеїв, багатошарового дрогового з'єднання, з'єднання і наскрізного заповнення, конформного покриття, а також прокладок і ущільнень [54].

Детальнішої інформації про технологію немає. Відомо, що вперше її було апробовано у 2021 р. та вона перебуває у стані інтенсивного розроблення та залучення інвестицій від ASMPT (англ. *ASM Pacific Technology*) та Henkel Adhesive Technologies. Стверджують придатність до роботи з такими матеріалами, як акрилат, епоксидна смола, силікон, металеві пасти, керамічні пасти, вуглецеві пасти, пасти для припою, резисти для припою, поліуретан та інші. Розробник технології компанія ioTech запропонувала першу бета-версію принтера io300s та проводить його випробування [16, 38].

Перевагою технології є те, що виробники електроніки зможуть інтегрувати повномасштабне цифрове виробництво, використовуючи при цьому стандартні промислові матеріали. Аналогічно, користувачі можуть використовувати можливості кастомізації системи, забезпечуючи при цьому належну якість 3D-друку. Ця технологія була задумана як екологічна альтернатива традиційним методам виробництва і здатна обробляти будь-який матеріал без шкоди для якості, роздільної здатності та ефективності. Очікують, що процес C.L.A.D. відкриє більше можливостей для інноваційного проектування в електронній промисловості за вироблення меншої кількості токсичних речовин і відходів [29, 38, 54].

Листове ламінування (англ. *Sheet Lamination*). Технології листового ламінування передбачають скріплення листових матеріалів, полімерів чи металів) для створення виробу [4]. З'єднання листів можна здійснювати за допомогою ультразвукового зварювання чи клейкого матеріалу. Перевагою технології є відносна дешевизна самого друку, проте вона передбачає багато процесів оброблення після друку для отримання готового продукту. Різновидом таких технологій, придатним для ви-

готовлення електронних плат, є процес пошарового ламінування матеріалом LOM (англ. *Laminated Object Manufacturing*) [9].

Пошарове ламінування (LOM). Основними компонентами системи LOM є механізм подачі, який переміщує лист робочою платформою, нагрітий ролик, що притискає лист до платформи чи нижнього шару, і лазер, який вирізає контур деталі в кожному шарі листа [12]. Деталі виготовляють способом укладання, склеювання та вирізання шарів листового матеріалу з клейовим покриттям поверх попереднього. Нагрітий ролик активує клей за температури +60...+80 °C і тиску 10-30 МПа, переміщаючись уздовж аркуша матеріалу і забезпечуючи з'єднання нового і попереднього шарів. Лазерний промінь формує контури нового шару відповідно до 3D-моделі, матеріал, що перебуває за межами контуру, розрізають на дрібні секції для спрощення процедури видалення. Робоча платформа з готовим новим шаром і підтримним матеріалом, що підлягає видаленню, опускається донизу на глибину, що дорівнює товщині листа (зазвичай 0,05-0,5 мм), і поверх раніше покладених шарів просувається ще один лист. Потім платформа злегка піднімається, і нагрітий ролик створює тиск для приклеювання нового шару. Лазер вирізає контур, і цикл повторюється до завершення друку, після чого зайвий матеріал видаляється і проводиться постоброблення виробу [11, 18, 19, 46].

Перевагами методу є: відсутність потреби в опорних конструкціях, оброблення тільки по периметру; відсутність хімічної реакції, завдяки чому не потрібна камера; легкість виготовлення великих моделей; можливість

з'єднання різноманітних матеріалів (будь-які матеріали, що поставляються у вигляді листа (пластики, композити, металева фольга, кераміка, папір, полімерна плівка)); низька собівартість; швидкість і точність виготовлення; висока продуктивність; висока механічна міцність продукту; екологічність; відсутність загрози для здоров'я [8, 9]. Недоліки технології також очевидні: складнощі під час з'єднання різних шарів; потреба в очищенні, що забирає багато зусиль; потенційна пожежонебезпека; відсутність технологічного рішення для створення з'єднань між шарами [11]. Ринкова пропозиція 3D-принтерів, що працюють за технологією LOM, обмежена кількома відносно недорогими моделями (декілька десятків тисяч доларів): Mcoг ARKePro, Mcoг Matrix 300+, Iris HD, Solido SD300 Pro [8].

Теоретично за цим методом можливе виготовлення односторонніх друкованих плат за допомогою цього методу без залучення інших технологій друку струмопровідними матеріалами, хоча перспективнішим видається використання цієї технології для виготовлення керамічних підкладок для друкованих плат.

Вибір технології друку. Для формування системи критеріїв вибору технології 3D-друку електронних плат потрібно сформувати систему техніко-експлуатаційних параметрів цих технологій, які забезпечать можливість їх порівняння з погляду виробника, інвестора та споживача друкованих плат. На підставі аналізу вимог до виробництва та експлуатації друкованих плат і узагальнення даних про досліджувані технології ми запропонували перелік таких параметрів (табл. 1).

Табл. 1. Техніко-економічні характеристики технологій 3D-друку електронних плат /
Characteristics of 3D printing technologies for printed circuit boards

Параметр	Технологія				
	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Aerosol Jet Technology (AJT)	Multi-Functional Additive Manufacturing (MFAM)	NanoParticle Jetting (NPJ)	Continuous Laser Assisted Deposition (C.L.A.D.)
Рівень зрілості технології*, балів	9	9	8	8	7
Вартість обладнання, USD	від 40 000	250 000-350 000	від 110 000	від 650 000	unknown
Стан виробничих матеріалів	Твердий (листи)	Рідина	Рідина	Рідина	Твердий, паста
Матеріали	Термопластики; папір; метали; кераміка	Мідь, срібло, золото; кераміка	Мідь, срібло, золото; кераміка	Кераміка, срібло	Метал, припій, резист для припою, поліуретан, керамічна паста
Доступність матеріалів*, балів	9	9	9	9	8
Складність технологічного процесу*, балів	5	7	8	9	10
Гнучкість у виробництві* (легкість переналагодження), балів	6	8	7	8	10
Продуктивність*, балів	4	8	7	6	8
Точність формування рисунка, мм	±0.1	±0.005	±0.016	±0.025	unknown
Максимальний розмір плати, мм	800×550×500	300×300×100	255×252×200	500×280×200	unknown
Мінімальна ширина провідника, мм	0,2	0,125	0,80	0,15	0,020
Мінімальна відстань між елементами друку, мм	0,2	0,125	0,060	0,15	0,020
Мінімальна товщина шару, мм	0,05	0,01	0,01	0,015	0,01
Стан обробленої поверхні	Шорстка	Дуже гладка	Середня	Гладка	Дуже гладка
Швидкість формування	Середня	Висока	Середня – висока	Середня – висока	Висока
Друк багатошарових плат	Ні	Так, 2-4 шари	Так, 2-4 шари	Так, 2-3 шари	Так, 5-7 шарів
Можливість реалізації ЕСТ	Ні	Так	Так	Ні	Так

Примітка: авторська розробка за даними [8, 9, 10, 11, 15, 23, 68].

Варто зауважити, що відсутність кількісних даних щодо деяких характеристик (у табл. 1 позначено *) дала авторам змогу здійснити тільки якісну оцінку їх баль-

них значень за порядковою та номінальними шкалами (0÷10) на підставі порівняння описаних переваг і недоліків технологій та фізики процесів, на яких вони ґрун-

туються; для деяких параметрів (*стан поверхні, швидкість формування) в табл. 1 збережено наведені у літературі якісні оцінювання. Параметр "мінімальна товщина провідника" враховано внаслідок його впливу на однорідність матеріалу провідника/діелектрик; характеристики виробничих матеріалів надалі враховують у параметрі "доступність матеріалу", параметр "швидкість формування" враховують у параметрі "продуктивність".

Отримані авторами за результатами аналізу численних публікацій значення обраних характеристик наведено в табл. 1.

Для візуалізації та порівняльного аналізу параметрів процесів 3D друку електронних плат пропонуємо застосувати метод карт (діаграм) властивостей технологічних процесів, який розробив Т. Пайтц для аналізу та спрощення вибору конкретної технології виготовлення тривимірних литих носіїв монтажних схем (3D MID) [22, 56]. Ці карти є полярними діаграмами, осями яких є попередньо обрані характеристики технологічних процесів, визнані за істотні з погляду мети аналізу. Такі діаграми спрощують порівняльну оцінку процесів завдяки візуалізації співвідношення їх характеристик та пришвидшують вибір конкретного технологічного процесу відповідно до бажаного результату і наявних можливостей. Фактично можна стверджувати, що карта властивостей є параметризованою індикативною моделлю технологічного процесу, змінними якої є кількісні та якісні характеристики процесу, значення яких приведено до єдиного нормованого оцінювання.

Застосування методу карт властивостей ґрунтується на виявленні характеристик (параметрів) технологічних процесів, істотних з погляду складності та економічної ефективності процесу, технологічних можливостей та параметрів отримуваних продуктів. Для 3D MID технологій Т. Пайтц запропонував для моделювання MID рішення вісім характеристик, більшість з яких відобра-

жає оцінювання отриманого за певною технологією тривимірного носія, а решта (асортимент доступних матеріалів, економічна ефективність для обмеженого розміру партій; інвестиційні витрати) може бути застосована для оцінювання впровадження будь-якої технології.

У роботі [22] запропоновано розширити спектр оцінкових параметрів 3D MID технологій до 16, серед яких такі параметри, як витрати на матеріали та оснащення, довжина технологічного ланцюжка та тривалість розроблення також можуть бути застосовані для моделювання будь-якого технологічного процесу. Оскільки різні характеристики процесів та їх продуктів оцінюють за різними шкалами, від якісних номінальної (спроможна/неспроможна, придатна/непридатна) та порівняльної (вище/нижче) до кількісних, для побудови полярних діаграм властивостей доцільно перевести оцінювання всіх характеристик у бальну шкалу з однаковою кількістю балів, наприклад, від 0 (результат відсутній) до 10 (результат на максимально можливому рівні).

Отже, для побудови карт властивостей треба передусім виділити істотні характеристики процесів 3D-друку з погляду виготовлення електронних плат, як в аспекті параметрів останніх, так і стосовно ефективності процесу виробництва. Окрім цього, недоцільно вносити у профіль рішення параметр, який буде однаково високим для всіх процесів, наприклад, придатність до протипування. За результатами проведеного аналізу з переліку характеристик (див. табл. 1) за такі параметри було обрано: рівень зрілості технології; вартість обладнання; доступність матеріалів; складність технологічного процесу; гнучкість у виробництві; продуктивність; точність (формування рисунка); максимальний розмір плати; мінімальна ширина провідника; мінімальна відстань між елементами друку; мінімальна товщина шару; стан обробленої поверхні; можливість друку багат шарових плат і придатність до реалізації ЕСТ.

Табл. 2. Порівняльне оцінювання параметрів технологій 3D-друку електронних плат /
Comparative assessment of the parameters of 3D printing technologies for printed circuit boards

Властивість, балів	Технологічний процес (повна та скорочена назви)				
	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Aerosol Jet Technology (AJT)	Multi-Functional Additive Manufacturing (MFAM)	NanoParticle Jetting (NPJ)	Continuous Laser Assisted Deposition (C.L.A.D.)
Рівень зрілості технології	9	9	8	8	5
Вартість обладнання	9	4	6	2	3
Доступність матеріалів	9	9	9	9	8
Складність технологічного процесу	5	7	8	9	10
Гнучкість у виробництві (легкість перена- лагодження)	6	8	7	8	10
Продуктивність	5	8	7	6	8
Точність формування рисунка	4	8	5	8	9
Максимальний розмір плати	10	6	6	8	7
Мінімальна ширина провідника	4	8	7	8	10
Мінімальна відстань між елементами друку	5	8	8	7	10
Мінімальна товщина шару	6	9	9	8	9
Стан обробленої поверхні	2	10	6	8	10
Швидкість формування	5	9	7	7	9
Друк багат шарових плат	0		8	7	8
Можливість реалізації ЕСТ	0	10	7	3	10
Економічна ефективність за малих розмірів партій	6	7	7	7	9
Економічна ефективність за великих розмірів партій	7	5	5	5	6

Для подальшої побудови карт властивостей кожного з процесів на підставі впливу різних характеристик на технологічні, операційні, економічні параметри вироб-

ництва та параметри отримуваних друкованих плат значення всіх характеристик (див. табл. 1) було переведено у бали (табл. 2), від 0 до 10, де 0 відповідає відсутності

чи наднизькому рівню властивості, а 10 – максимально, найкращому з погляду процесу та його продукту рівню. Бальну оцінку вартості обладнання та точності формування рисунка для процесу C.L.A.D. виставлено на підставі діапазону вартості принтерів для SLS (англ. *Selective Laser Sintering*) та SLM (англ. *Selective Laser Melting*) процесів (від 5 до 40 тис. дол.), розмірів деталей та роздільної здатності, забезпечуваної цими процесами (20-150 μm для SLS та 20-200 μm для SLM) [27] з урахуванням унікальності обладнання та меншої зрілості технології.

Як показано у роботі [22], ефективнішими для вибору конкретного процесу є не індивідуальні карти окремих процесів, а суміщені карти кількох процесів з альтернативними значеннями істотних для вибору характеристик. Суміщені діаграми для групи процесів, які забезпечують друк багатшарових плат, як найбільшого виробничого сегменту складної електроніки, наведено на рис. 1.

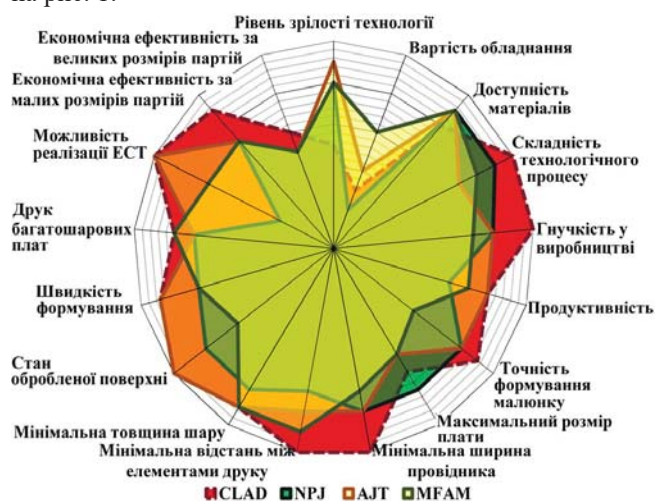


Рис. 1. Суміщена діаграма властивостей технологічних процесів 3D-друку, придатних для виготовлення багатшарових плат (AJT, MFAM, NPJ та C.L.A.D.) / Combined diagram of the properties of 3D printing processes suitable for multilayer board manufacturing (AJT, MFAM, NPJ and C.L.A.D.)

Згідно з рис. 1, усі розглянуті процеси забезпечують параметри плат, що відповідають стандартам, проте:

- для плат високої точності та щільності пакування найкращі показники демонструють технології AJT та C.L.A.D.;
- C.L.A.D. потенційно забезпечує найкращі параметри друкованих плат і можливість використання різноманітних матеріалів, хоча технологія все ще перебуває у процесі тестування і немає даних про пристрої, виготовлені за нею;
- AJT і C.L.A.D. придатні для створення багатшарових плат і реалізації ЕСТ, що робить їх найбільш перспективними для задоволення потреб мініатюризації пристроїв.
- процес C.L.A.D. має перевагу за основними техніко-експлуатаційними параметрами, але істотно програє за зрілість технології та вартість обладнання. Окрім цього, обладнання та деталі технологічного процесу наразі є важко доступними.

Для порівняння найпоширеніших процесів, що використовують друк за допомогою чорнил, варто скористатися окремою діаграмою, вилучивши C.L.A.D. (рис. 2). Згідно з даними цього рисунку, процес MFAM забезпечує найкращі показники щільності друку і мінімальну товщину провідника, програючи за станом обробленої поверхні та економічною ефективністю для серійного

виробництва. NPJ є найпростішим процесом і забезпечує легке переналадження за великих розмірів плат, практично не надаючи можливостей створення ЕСТ, а AJT є найточнішим і найпродуктивнішим процесом. Залежно від пріоритетності тих чи інших параметрів та наявної технологічної та економічної баз можна здійснити вибір потрібного процесу.

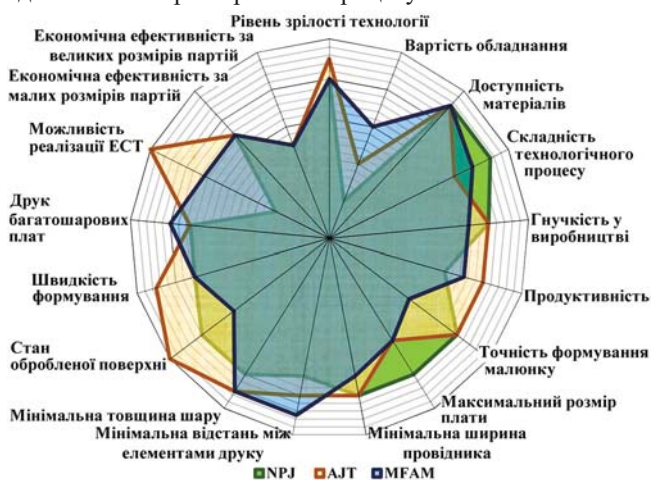


Рис. 2. Суміщена діаграма властивостей зрілих технологічних процесів 3D-друку, з використанням спеціального чорнила (AJT, MFAM та NPJ) / Combined diagram of properties of mature 3D printing processes using special inks (AJT, MFAM and NPJ)

Якщо пріоритетні параметри є близькими для кількох процесів, варто перейти до попарного їх оцінювання, будуючи суміщені полярні діаграми властивостей для двох процесів (рис. 3). Таке подання спрощує візуалізацію переваг і недоліків процесів і вибір найбільш придатного для конкретних умов.

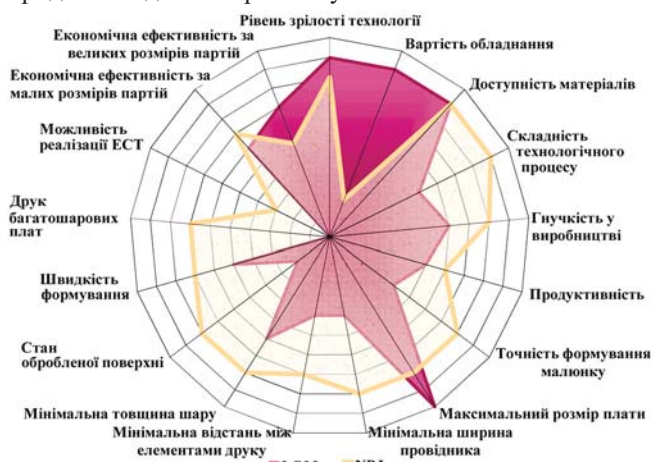


Рис. 3. Суміщена діаграма властивостей технологічних процесів LOM та NPJ / Combined diagram of LOM and NPJ process properties

Згідно з рис. 3, для одношарових плат більшого розміру, або мультизаготовок, переваги має технологія LOM. Основною перевагою LOM є вартість обладнання, доступність технології та її зрілість. Тому для виготовлення електронних плат із простою геометрією рисунка доцільний вибір саме такої технології. У всіх інших випадках прийнятною є технологія NPJ.

Відповідно до вимог різних сфер використання і завдань, які вирішують для їхніх продуктів застосуванням адитивних методів друку електронних плат, можна оцінити перспективність застосування кожного з розглянутих технологічних процесів для впровадження у

виробництво друкованих плат для задоволення потреб конкретної галузі і виробів певного типу (табл. 3).

Отже, застосування запропонованої методики дає змогу спростити первинний відбір потрібного техноло-

гічного процесу не тільки на підставі вимог до конкретних плат, але й за галуззю застосування, уточнюючи його відповідно до даних суміщених карт властивостей обраних одного-двох процесів.

Табл. 3. Перспективи застосування адитивних технологій друку електронних плат у різних сферах використання /
Prospects of introducing the PCB additive technologies in various areas of application

Сфера використання	Побутова техніка та вся промислова електроніка	Енергетика, аерокосмічна, електронні комунікації, автомобілебудування, технологічне обладнання, військова	Аерокосмічна, медичне обладнання, автомобілебудування, військова	Комп'ютери, електронні комунікації, медичне обладнання, автомобілебудування	Медичне обладнання, автомобілебудування, аерокосмічна, електронні комунікації, військова	Медичне обладнання, автомобілебудування, аерокосмічна, електронні комунікації, військова
Тип застосовуваної плати	Жорсткі друковані плати				Гнучкі друковані плати	Гнучко-жорсткі друковані плати
Матеріал	Діелектричні	Металеві	Керамічні	Багатошарові		
	FR4, CEM-1, CEM-3, фторопласт	Алюміній, мідь, сталь	Кераміка	FR4, поліамідна плівка,	Поліамідна плівка	FR4, поліамідна плівка
Технології друку	AJT	+	+	+	+	+
	LOM	+	+			
	NPJ	+	+	+		
	MFAM	+	+	+	+	+
	C.L.A.D		+	+		+

Визначені кількісні значення параметрів виробів, отриманих за різними технологічними процесами, дають змогу порівняти ці процеси за отриманим результатом та оцінити придатність процесу для виготовлення електронних плат під конкретне технічне завдання. Цей процес спрощується за подання параметризованих моделей процесів у вигляді карт властивостей. Усі процеси мають ті чи інші проблеми з вибором матеріалів та їх сумісністю, що є критично важливим для деяких медичних застосувань, обробленням поверхні та контролем якості. Однак, упровадження процесу в промислове виробництво залежить також від низки експлуатаційних та економічних параметрів (інвестиційні витрати, вартість та доступність матеріалів та обладнання, тривалість технологічного циклу, екологічність, гнучкість виробництва, економічна ефективність за різних розмірів партій тощо), і вибір конкретного процесу буде визначатися критеріями, які враховуватимуть ці параметри. Оцінювання значень цих параметрів та порівняння процесів за цими показниками з урахуванням параметрів продукції має стати предметом подальших досліджень.

Обговорення результатів дослідження. У роботі [6] розглядають способи, якими впровадження адитивних технологій 3D-друку (англ. *3D Printing Technology*) трансформує електротехніку, сприяючи розвитку сталих енергетичних систем, міської інфраструктури та промислових інновацій. Досліджують застосування 3D-друку у виробництві енергоефективних компонентів, таких як фотоелектричні елементи, деталі вітрових турбін і систем зберігання енергії, а також його роль у створенні прототипів і технологіях "розумних" електромереж. Впровадження новітніх матеріалів, зокрема струмопровідних полімерів і біорозкладних композитів, сприяє розвитку систем відновлюваної енергетики та індивідуальних рішень для міських і промислових застосувань. Зменшуючи відходи матеріалів, знижуючи виробничі витрати та пришвидшуючи інноваційні цикли, 3D-друк сприяє сталому виробництву та розвитку стійкої інфраструктури. Обговорюють такі проблеми, як сумісність матеріалів, масштабованість і витрати, а також нові технології, такі як штучний інтелект (ШІ) та

Інтернет речей (IoT), які покращують їх удосконалення та розширюють можливості його застосування. Це дослідження підкреслює важливу роль 3D друку в розвитку сталої енергетики, міського розвитку та промислової модернізації.

У роботі [35] розглядають використання технології адитивного виробництва (англ. *Additive Manufacturing*), більш відомої як 3D-друк (англ. *3D printing technology*), для виготовлення антен для зв'язку п'ятого покоління (5G) у міліметровому діапазоні (mmWave). Показано, що технологія 3D-друку має великі перспективи у виробництві радіочастотних і мікрохвильових компонентів і особливо підходить для виробництва компонентів мм-хвильового діапазону, таких як антени. Запропонована антена є прямокутним пластиним з діелектричною підкладкою з акрилонітрил-бутадієн-стиролу (АБС), виготовлений за допомогою технології 3D-друку, водночас як її провідні частини покриті нікелевою струмопровідною фарбою. Результати вимірювань показують, що виготовлена антена може працювати в діапазоні частот від 24,6 ГГц до 27,8 ГГц з максимальним коефіцієнтом підсилення 4,4 dB. Автори стверджують, що завдяки перевагам застосованої технології можливе подальше покращення параметрів антен, що важливо для прогресу в галузі телекомунікацій.

У роботі [25] розглядають потенційні переваги адитивного виробництва (AM), або 3D-друку, завдяки яким AM набуває щораз більшого поширення як альтернативна технологія виробництва традиційним методам завдяки простоті налаштування, меншій кількості відходів та економічності. Проте, як показують автори цієї роботи, є замало досліджень щодо застосування цієї технології у галузі розроблення високочастотних матеріалів і стратегій їхнього друку, відчувається брак ґрунтового аналізу сучасних розробок у цій галузі, який би допоміг дослідникам відповідно спрямувати свою наукову діяльність для конвергенції їхнього досвіду з AM-технологією. Автори навели розробки стосовно високочастотних матеріалів, процесів 3D-друку (англ. *3D Printing*) таких матеріалів і їх застосування як різних високочастотних компонентів і пристроїв та обговорюють результати досліджень діелектричних властивостей

високочастотних друкованих 3D-компонентів та їх застосування. Також представлено майбутню сферу застосування технології 3D-друку в цій галузі.

У роботі [26] досліджують перспективи виготовлення 3D-друкованої електроніки за допомогою настільних принтерів з використанням новітніх провідних термопластичних ниток. Через їхній високий опір, більшість застосувань провідних термопластичних ниток обмежується ємнісним зондуванням. У цій роботі запропоновано новий підхід з виготовлення компонентів 3D-друкованої електроніки на підставі термоформованої друкованої плати PCB (англ. *Circuit Board*), який використовує здатність 3D-друкованих пластиків до термоформування для створення різних двосторонніх, жорстких і високопровідних плат довільної форми, які можуть витримувати великі струми завдяки гальванічному покриттю міддю. Можливості підходу підтверджено низкою прикладів. Розроблено також нове розширення інструменту проєктування для наявного середовища САПР, яке дає користувачам змогу параметрично креслити основу і друковані провідники, а також експортувати файли для 3D-друку. Запропонована технологія є недорогою і придатною для застосування у різних дослідженнях.

У роботі [64] досліджують недоліки ітеративного процесу прототипування (англ. *Prototyping*) друкованих плат (PCB), які полягають у тому, що компоненти пристроїв поверхневого монтажу (SMD), відкинуті впродовж попередніх ітерацій, не використовують повторно через проблеми, пов'язані з випаюванням, що призводить до утворення непотрібних електронних відходів. У роботі наведено набір методів для створення прототипів друкованих плат PCBs (англ. *Printed Circuit Boards*) без припаювання SolderlessPCB, спеціально розроблених для сприяння переробленню та повторному використанню електронних компонентів. Центральне місце в цьому підході належить спеціальним 3D-друкованим корпусам, які дають змогу встановлювати SMD-компоненти на друковані плати без пайки. Детально описано конструкцію друкованої плати PCB (англ. *Printed Circuit Board*) SolderlessPCB та експерименти, проведені для оцінювання її конструкційних параметрів, електричних характеристик та довговічності. Показано можливості багаторазового використання SMD-компонентів з SolderlessPCB у разі повторного використання компонентів з попередніх ітерацій проєктування і зі застарілих прототипів. Показано, що SolderlessPCB може працювати з високими струмами і підходить для високошвидкісної передачі даних. Також обговорюють обмеження пропонованого підходу і пропонують майбутні напрями для подолання цих проблем.

У роботі [59] розглядають можливості друку складних конструкцій електронних пристроїв на 3D-принтері DragonFly 2020 LDM без традиційного заводського виробництва завдяки особливостям інноваційної технології адитивного друку багатостарових прототипів друкованих плат. У технології застосовують тільки два матеріали: струмопровідні наночорнила (англ. *Conductive Nanoink*) на підставі 50 % срібла з терміном придатності 12 місяців та діелектричні наночорнила на підставі акрилату з терміном придатності 9 місяців. У роботі розглянуто успішний практичний досвід використання протермінованих чорнил у поліграфії.

Унаслідок обговорення результатів дослідження було встановлено, що всі публікації підтверджують перспективність запровадження технологій 3D-друку електронних плат, активно розробляють нові матеріали та вдосконалюють технологічні операції, проте вочевидь бракує обґрунтованих критеріїв та методики вибору готового технологічного процесу для впровадження у виробництво.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено метод до систематизації параметрів технологічних процесів адитивного виготовлення електронних плат, на підставі якого побудовано параметризовані моделі кожного з цих процесів у вигляді полярних діаграм властивостей, суміщення яких у межах однієї діаграми візуалізує переваги і недоліки кожного процесу та вдосконалює вибір оптимального технологічного процесу створення адитивних 3D-друкованих плат для електронних модулів згідно з заданими їх параметрами та технічними можливостями виробництва.

Практична значущість результатів дослідження – запропонована методика може бути застосована для обґрунтування вибору технологічного процесу адитивного виготовлення електронних плат на множині наявних на ринку технологій та обладнання.

Висновки / Conclusions

Удосконалено методику оцінювання та критерії вибору технології виготовлення 3D електронних плат як основу апаратного забезпечення, що дало змогу виділити технологічні процеси, практично придатні для їх промислового виробництва. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано наявні технології 3D-друку та впорядковані їх параметри відповідно до вимог сучасних друкованих плат для електронних модулів згідно зі заданими їх параметрами та технічними можливостями виробництва.
2. На підставі результатів аналізу технологій об'ємного друку встановлено п'ять технологічних процесів, які дадуть змогу отримувати вироби з технічними та експлуатаційними параметрами, що відповідають вимогам до сучасних друкованих плат, та мають перспективи до подальшого покращення цих параметрів.
3. Визначено кількісні значення параметрів виробів, отриманих за цими процесами, що дало змогу порівняти ці процеси за отриманим результатом.
4. Результати порівняння створили можливість оцінити придатність того чи іншого процесу для виготовлення друкованої плати за конкретним технічним завданням.
5. Побудовано параметризовані моделі досліджених процесів у вигляді полярних діаграм властивостей та запропоновано методику їх використання для вибору найпридатнішого технологічного процесу шляхом створення суміщених діаграм. Обґрунтовано, що найефективніше проводити суміщення в межах однієї діаграми моделей двох процесів.
6. Застосування розроблених моделей спростило і пришило процедуру вибору конкретного технологічного процесу та забезпечило обґрунтованіший результат вибору.
7. Розширення спектра параметрів для побудови моделей процесів та оцінювання їх кількісних значень – предмет подальших досліджень.

References

- 3D Printing Industry. (2016). Optomec 3D printing smartphones. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/optomec-3d-printing-smartphones-87740/>
- AMPOWER. (2024). AMPOWER report on additive manufacturing: Management summary. URL: <https://ru.scribd.com/document/719680785/AMPOWER-Report-2024-Management-Summary>
- Andwin Circuits. (2024). Revolutionizing PCB production with additive manufacturing techniques. URL: <https://www.andwinpcb.com/revolutionizing-pcb-production-with-additive-manufacturing-techniques/>
- ASTM International. (2021). Additive manufacturing – General principles: Fundamentals and vocabulary (ASTM 52900:2021). URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/482823e1-57b2-481f-87e7-11da730ba16f/2-astm-52900-2021>
- Bead Electronics. (n.d.). Innovations with PCB manufacturing through 3D printing. URL: <https://www.beadelectronics.com/blog/innovations-with-pcb-manufacturing-through-3d-printing>
- Benitez, I. B. (2025). Innovations in electrical engineering using 3D printing technology: A review. *2024 International Conference on IT Innovation and Knowledge Discovery (ITIKD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITIKD63574.2025.11005248>
- Birnbaum, R. (2023, January 30). Digital mass manufacturing of electronics – Breaking the mold [Video]. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=waJnsDSwLdk>
- Cadence. (2020). Laminated Object Manufacturing: The Future of Rapid PCB Prototyping? URL: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-is-laminated-object-manufacturing-the-future-of-rapid-pcb-prototyping>
- CustomPartNet. (n.d.). Laminated Object Manufacturing (LOM). Retrieved August 19, 2024. URL: <https://www.custompartnet.com/ww/laminated-object-manufacturing>
- CustomPartNet. (n.d.). Process Comparison Tool. Retrieved February 19, 2025. URL: <https://www.custompartnet.com/rapid-process-compare?p=94,90,168,169>
- Dermeik, B., & Travitzky, N. (2020). Laminated object manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(9), article ID 2000256. <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Dong, Y., Bao, C., & Kim, W. S. (2018). Sustainable Additive Manufacturing of Printed Circuit Boards. *Joule*, 2(4), 579–582. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.015>
- DuPont. (n.d.). Inkjet printing for eco-friendly PCB etch processes. URL: <https://www.dupont.com/blogs/inkjet-printing-for-eco-friendly-pcb-etch-processes.html>
- ELEPCB. (2024). What is PCB printing. URL: <https://www.elepcb.com/blog/3d-pcb-printing/>
- Eletimes. (n.d.). World's first continuous laser assisted deposition technology. Retrieved February 19, 2025. URL: <https://www.ele-times.com/worlds-first-continuous-laser-assisted-deposition-technology-c-l-a-d>
- Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2019). 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 245–267. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00077-7>
- Feygin, M., & Hsieh, B. (n.d.). Laminated Object Manufacturing (LOM): A Simpler Process. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/server/api/core/bitstreams/95bf7a6d-8ea9-4a47-bc81-4a3dd320a8e4/content>
- Fidan, I., Huseynov, O., Ali, M. A., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., Hasanov, S., Tantawi, K., Yasa, E., Yilmaz, O., Loy, J., Popov, V., & Sharma, A. (2023). Recent inventions in additive manufacturing: Holistic review. *Inventions*, 8(4), article ID 103. <https://doi.org/10.3390/inventions8040103>
- Grand View Research. (2022). Printed electronics market size, share & trends analysis report by material (substrate, ink), by technology (inkjet, screen), by device (displays, RFID), by region (Asia Pacific, Europe), and segment forecasts, 2022–2030 (Report ID: 978-1-68038-180-1, 133 p.). URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/printed-electronics-market>
- Hackaday. (2022, July 26). A new way to produce PCBs with your 3D printer. Hackaday. URL: <https://hackaday.com/2022/07/26/a-new-way-to-produce-pcbs-with-your-3d-printer/>
- Hlinenko, L. K., & Fast, V. M. (2017). System Choice of Optimal Technological 3D MID Solution. Transactions of National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute". Part: Radiotechnique. *Radioapparatus building*, 69, 56–61. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2017_69_11
- Hlinenko, L., Fast, V., & Zanchikovskyy, Y. (2024). 3D printing of PCBs in biomedical device. In *2024 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 544–547). <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755549>
- Hoerber, J., Glasschroeder, J., Pfeffer, M., Schilp, J., & Zaeh, M. (2014). Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications. *Procedia CIRP*, 17, 806–811. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.090>
- Holkar, R. R., Umarji, G. G., Shinde, M. D., & Rane, S. B. (2025). 3D printing of microwave materials, components and their applications – A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 137, 280–305. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.006>
- Hong, F., Myant, C., & Boyle, D. E. (2021). Thermoformed circuit boards: Fabrication of highly conductive freeform 3D printed circuit boards with heat bending. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (article ID 669, pp. 1–10). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445469>
- Huang, Q., & Zhu, Y. (2019). Printing conductive nanomaterials for flexible and stretchable electronics: A review of materials, processes, and applications. *Advanced Materials Technologies*, 4(7), article ID 1800546. <https://doi.org/10.1002/admt.201800546>
- Immensa. (n.d.). Powder Bed Fusion (SLS vs SLM vs EBM vs MJF). Retrieved August 19, 2024. URL: <https://immensa.io/powder-bed-fusion-sls-vs-slm-vs-ebm-vs-mjf-additive-manufacturing/>
- Javice, H. (n.d.). C.L.A.D. – Continuous Laser-Assisted Deposition: Sustainability, Flexibility and Product Miniaturisation [Video]. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=P88xrQxd7Ec>
- Kamyshny, A., & Magdassi, S. (2018). Conductive nanomaterials for 2D and 3D printed flexible electronics. *RSC Advances*, 6(2), 2818–2827. <https://doi.org/10.1039/C5RA23440G>
- Kritchman, E., et al. (2021). 3D particle printing (U. S. Patent No. US20210354365A1). XJet Ltd. URL: <https://patents.google.com/patent/US20210354365A1>
- Leadsintec. (2024). The application of 3D printing technology in PCB manufacturing. URL: <https://leadsintec.com/the-application-of-3d-printing-technology-in-pcb-manufacturing/>
- Martins, P., Correia, V., & Lanceros-Mendez, S. (2021). Additive manufacturing of multifunctional materials. In *Advanced Lightweight Multifunctional Materials* (Chapter 2, pp. 25–42). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818501-8.00011-1>
- Martins, P., Pereira, N., Lima, A. C., Garcia, A., Mendes-Filipe, C., Policia, R., Correia, V., & Lanceros-Mendez, S. (2023). Advances in printing and electronics: From engagement to commitment. *Advanced Functional Materials*, 2(7), 24–29. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213744>
- Maulana, M. F., Zulfi, Sulistyaningsih, Darwis, F., Desvasari, W., & Munir, A. (2024). On the use of 3D printing technique for 5G mmWave antenna development. *2024 15th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMW)*, pp. 39–41. <https://doi.org/10.1109/GSMW61775.2024.10553193>
- MMT-AM. (n.d.). Xjet's NanoParticle Jetting™ (NPJ™). URL: <https://mmt-am.com/capabilities/xjet-nanoparticle-jetting/>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

38. OPE Journal. (2023, November). ioTech pushes boundaries of miniaturisation for semiconductor packaging and assembly at Pro-ductronica 2023. URL: <https://ope-journal.com/news/iotech-pushes-boundaries-of-miniaturisation-for-semiconductor-packaging-and-assembly-at-productronica-2023>
39. Optomec. (2018, August). Aerosol Jet FLEX System [PDF]. URL: <https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/08/AJ-FLEX-SystemWEB0818.pdf>
40. Optomec. (2021, June). Aerosol Jet 4 datasheet [PDF]. URL: https://optomec.com/wp-content/uploads/2021/06/4-Datasheet_2-1.pdf
41. Optomec. (n.d.). Aerosol Jet 3D printing for printed antennas in smartphones and consumer devices. URL: <https://optomec.com/printed-antennas/>
42. Optomec. (n.d.-a). Aerosol Jet materials (datasheets). Retrieved May 20, 2025. URL: <https://optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
43. Optomec. (n.d.-b). Aerosol Jet technology. Retrieved May 20, 2025. URL: <https://optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
44. Ota, H., Emaminejad, S., Gao, Y., Zhao, A., Wu, E., Challa, S., Chen, K., Fahad, H., Jha, A., Kiriya, D., Gao, W., Shiraki, H., Morioka, K., Ferguson, A., Healy, K., Davis, R., & Javey, A. (2016). Application of 3D printing for smart objects with embedded electronic sensors and systems. *Advanced Materials Technologies*, 1(1), article ID 1600013. <https://doi.org/10.1002/admt.201600013>
45. PADT Inc. (n.d.). Nanoparticle Jetting [NPJ]. URL: <https://www.padtinc.com/digital-manufacturing/3dprinting-glossary/>
46. Park, J., Tari, M. J., & Hahn, H. T. Characterization of the Laminated Object Manufacturing (LOM) process. URL: https://web.archive.org/web/20040902105109id_/https://ime.ucla.edu:80/~jpark/Research/jp.pdf
47. Rao, C. H., Avinash, K., Varaprasad, B. K. S. V. L., et al. (2022). A review on printed electronics with digital 3D printing: Fabrication techniques, materials, challenges and future opportunities. *Journal of Electronic Materials*, 51, 2747–2765. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09579-7>
48. RayPCB. (n.d.). PCB Screen Printing vs PCB Inkjet Printing: What's the Difference?. URL: <https://www.raypcb.com/pcb-screen-printing-vs-pcb-inkjet-printing/>
49. Renn, M. J., Schrandt, M., Renn, J., & Feng, J. Q. (2017). Localized laser sintering of metal nanoparticle inks printed with aerosol jet technology for flexible electronics. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 14(4), 132–139. <https://doi.org/10.4071/imaps.521797>
50. Saleh, E., et al. (2017). 3D inkjet printing of electronics using UV conversion: Supporting information. URL: <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admt.201700134>
51. Saleh, E., Zhang, F., He, Y., Vaithilingam, J., Fernandez, J., Wildman, R., Ashcroft, I., Hague, R., Dickens, P., & Tuck, C. (2017). 3D inkjet printing of electronics using UV conversion. *Advanced Materials Technologies*, 2(10). <https://doi.org/10.1002/admt.201700134>
52. Seiti, M., Degryse, O., Ferraro, R. M., Giliani, S., Bloemen, V., & Ferraris, E. (2023). 3D Aerosol Jet® printing for microstructuring: Advantages and limitations. *International Journal of Bioprinting*, 9(6), article ID 0257. <https://doi.org/10.36922/ijb.0257>
53. Seiti, M., Verma, A., Degryse, O., Vetrano, M. R., & Ferraris, E. (2023). Aerosol jet-based printing for smart multifunctional nano-inks. In R. K. Gupta & T. A. Nguyen (Eds.), *Smart Multifunctional Nano-inks* (Chapter 4, pp. 75–90). Elsevier, 23–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91145-0.00013-X>
54. Sher, D. (2024). ioTech shapes a flexible future for 3D printed electronics. *Voxel Matters*. URL: <https://www.voxelmatters.com/iotech-shapes-a-the-flexible-future-of-3d-printed-electronics/>
55. SYS Systems. (2020). Connex3 [Spec Sheet]. URL: <https://www.sys-uk.com/wp-content/uploads/2020/06/Spec-Sheet-36-Connex3-EN-A4.pdf>
56. Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID): Materials, Manufacturing, Assembly, and Applications for Injection Molded Circuit Carriers. (2014). Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-56990-552-4>
57. Tri-Tech 3D. (n.d.). Jet Carmel 1400C 3D Printer: Ultimate Ceramic Additive Manufacturing System. URL: <https://www.tritech3d.co.uk/3d-printers/xjet-carmel-1400c/>
58. University of Nottingham. (2017). New method developed to 3D print fully functional electronic circuits. URL: <https://www.nottingham.ac.uk/news/pressreleases/2017/november/new-method-developed-to-3d-print-fully-functional-electroniccircuits.aspx>
59. Vorunichev, D. S. (2021). Investigation of the possibilities of printing multilayer printed circuit boards on a Dragonfly 3D printer with expired nanoink. 2021 *International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, pp. 476–479. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642766>
60. Wibawa, T., Mastriswadi, H., & Ismianti, I. (2020). 3D print parameter optimization: A literature review. *LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta Conference Series Proceeding on Engineering and Science Series (ESS)*, 1(1), 146–151. <https://proceeding.rspress.com/index.php/ess/index>
61. Wohlers, T. (2024). Wohlers report 2024: 3D printing and additive manufacturing: Global state of the industry (384 p.). Wohlers Associates. URL: <https://wohlersassociates.com/wohlers-report-2024-downloads/>
62. Whelan, P. T. (1992, June). An information model for a CAM data base to support flexible manufacture of printed circuit boards. In *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 15, no. 3, pp. 306–310. <https://doi.org/10.1109/33.148495>
63. XJet. (n.d.). XJet to present world's first direct 3d metal ink-jet system using Nano Particle Jetting. URL: <https://www.xjet3d.com/pr/news-from-rapid>
64. Yan, Z., Li, J., Zhang, Z., & Peng, H. (2024). Solderless PCB: Reusing electronic components in PCB prototyping through detachable 3D printed housings. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Article 345, pp. 1–17). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3613904.3642765>
65. Yang, C.-J., & Wu, S.-S. (2022). Sustainable manufacturing decisions through the optimization of printing parameters in 3D printing. *Applied Sciences*, 12(19), article ID 10060. <https://doi.org/10.3390/app121910060>
66. Zhai, C., Wang, J., Tu, Y., Chang, G., Ren, X., & Ding, C. (2023). Robust optimization of 3D printing process parameters considering process stability and production efficiency. *Additive Manufacturing*, 71 p. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103588>
67. Zhang, H., Moon, S. K., & Ngo, T. H. (2020). 3D printed electronics of non-contact ink writing techniques: Status and promise. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 511–524. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00139-9>
68. Zheng, X., Williams, C., Spadaccini, C. M., & Shea, K. (2021). Perspectives on multi-material additive manufacturing. *Journal of Materials Research*, 36, 3549–3557. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00388-y>
69. Zhong, S., Shi, Q., Deng, Y., Sun, Y., Politis, C., & Yang, S. (2022). High-performance zirconia ceramic additively manufactured via NanoParticle Jetting. *Ceramics International*, 48(22), 33485–33498. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.294>
70. Zikulnig, J., Chang, S., Bito, J., Rauter, L., Roshanghias, A., Carrara, S., & Kosel, J. (2023). Printed electronics technologies for additive manufacturing of hybrid electronic sensor systems. *Advanced Sensor Research*, 2(7). <https://doi.org/10.1002/adsr.202200073>
71. Ziv, C. (2019). A guide to additive manufacturing material selection for PCBs and electronics. Nano-DI. URL: <https://www.nano-di.com/resources/blog/2019-a-guide-to-additive-manufacturing-material-selection-for-pcbs-and-electronics>

JUSTIFICATION FOR THE CHOICE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY OF ELECTRONIC MODULES

Additive manufacturing methods are being widely applied in the production of various electronic devices due to shorter production cycles, faster prototyping, zero waste and suitability for integrating components within a printed circuit board (PCB). However, more effective implementation of these methods requires a deeper understanding of the advantages and disadvantages of a particular technology for manufacturing a PCB with specified parameters and under certain conditions. The aim of the study is to analyse 3D printing technologies and determine the criteria for choosing a specific process for PCB manufacturing. The results of our analysis of modern additive 3D printing technologies revealed that only five processes meet the requirements for PCB parameters: NanoParticle Jetting (NPJ), Aerosol Jet Technology (AJT), Multi-Functional Additive Manufacturing (MFAM), Laminated Object Manufacturing (LOM) and Continuous Laser Assisted Deposition (C.L.A.D.). The justified choice of a particular process for manufacturing the particular PCB requires the possibility of comparing the processes by values of the parameters sufficiently characterising each process in terms of both the product and the manufacturing process itself. By analysing the requirements for the production and operation of PCBs and generalising the data on the studied technologies, we have suggested a list of such parameters and determined their quantitative and qualitative (based on the physics of the underlying processes) values, which, in comparison with the requirements and limitations of the project, can be used as criteria for selecting a 3D process. Representation of the parameters of each process in the form of a Peitz property card has been justified to visualise pros and cons of each process. Such a representation requires all parameters to be scored in the same range, which necessitated a corresponding recalculation of the previously estimated actual parameters. We prove that the choice of a particular technology is simplified by using superimposed diagrams of the processes under consideration (the so-called combined property maps), which we have developed for several combinations of processes. The examples of application of the proposed method demonstrate the effectiveness of its use for illustrating the strengths and weaknesses of each process, as well as for comparing them and choice of the best-fit one for manufacturing the PCB with specified parameters under certain conditions of production

Keywords: Peitz property card; polar diagrams; 3D printing technology; printed circuit board (PCB); additive manufacturing; prototyping; conductive nanoink.