

Олександр АЗАРХОВ¹, д-р мед. наук, проф.,
Олександр ЯВОРСЬКИЙ², д-р мед. наук, проф.,
Іван СІЛІ¹, канд. техн. наук, доц.

¹ ДВНЗ «Призовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: azarhov_a_y@pstu.edu

² Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна, e-mail: yavor.av@gmail.com

СУЧАСНИЙ СТАН У ВИРОБНИЦТВІ 3D-ДРУКОВАНИХ БІОСЕНСОРІВ МЕТОДОМ DLP

Анотація. Популярність 3D-друкованих гнучких сенсорів в останні роки різко зростає. Незалежно від галузі, в якій вони використовуються, сенсори стають невід’ємною частиною нашого повсякденного життя. Фізичні біосенсори для моніторингу різних показників, включаючи температуру, глюкозу та ін., мають шанс найбільш широко використовуватися технологіями у світі. Крім того, сучасний стан розвитку біоінженерії обумовлює необхідність у мульти-сенсорах з різними можливостями, які виготовляються в одному пристрої. Потреба у складних та гнучких сенсорах призвела до розвитку технології 3D-друку для їхнього виробництва. Технологія 3D-друку – це універсальний процес, який може бути використаний для легкого виготовлення витончених, багатофункціональних сенсорів. У даній роботі головна увага зосереджена на останніх досягненнях у розробці 3D-друкованих сенсорів для біомедичних застосувань.

Ключові слова: сенсор, 3D-друк, метод цифрового світлового проектування, DLP, технологія.

Актуальність дослідження

Будь-який пристрій, який здатний виявляти та реагувати на вхідний сигнал від навколишнього середовища, а потім перетворювати цей вхідний сигнал в оброблений сигнал, що може бути електронно відправлений до іншого місця або відображений для перегляду людиною на екрані, розташованому на пристрої, прийнято називати сенсором. Вхідний сигнал може мати будь-який характер: тиск, температура, напруга, світло або вологість. Подібні сенсори стають все більш важливими для повсякденного життя завдяки технологічним проривам, які вимагають постійних поліпшень у технології сенсорів та методах їх виробництва. Основний фактор, що впливає на дослідження у сфері сенсорів, – це високий попит, і робота зосереджена на останніх досягненнях у друку 3D гнучких сенсорів, з особливим акцентом на сенсорах для біомедичних застосувань.

Мета роботи полягає у вивченні та розвитку методів 3D друку біосенсорів за допомогою цифрового світлового проектування DLP з метою покращення їхньої чутливості, швидкості та точності для застосування у біомедичних діагностичних системах.

Основні матеріали досліджень

Традиційні методи виготовлення сенсорів для мікрофлюїдних пристроїв мають суттєві недоліки, такі як великий час обробки, складні процедури процесу та відсутність масштабованості та гнучкості [1]. Крім того, такі традиційні сенсори мають вроджений жорсткий форм-фактор, який обмежує гнучкість та можливості розтягування [2]. Оскільки ці сенсори вимагають спеціальної форми та геометрії для їх широкого застосування, необхідність у новій та вдосконаленій техніці виготовлення є необхідною. Це призвело до появи нової технології, відомої як технологія адитивного виробництва для виготовлення сенсорів. Технічно, адитивне виробництво може бути визначено як основний процес формування, описаний наступним чином – «процес з’єднання матеріалів для створення об’єктів з даних 3D-моделі, зазвичай шар за шаром» [3]. Простими словами, адитивне виробництво, зазвичай називається 3D-друкуванням, це процес, який включає друк та виготовлення компонентів необхідного матеріалу, шар за шаром, до тих пір, поки не буде виготовлена бажана модель. Хоча адитивне виробництво загалом відоме як 3D-друкування, є чітка відмінність між цими двома термінами. Термін адитивне виробництво включає низку кроків, використаних для виготовлення чогось з нуля, шар за шаром, а 3D-друк є кроком, включеним у ці процеси. Таким чином, 3D-друк у загальному може розглядатися як підсекція адитивного виробництва.

Сенсори відіграють важливу роль у великій кількості застосувань: сьогодні, потреба в гнучких сенсорах набуває першочергового значення, оскільки такі сенсори вводяться в біомедицину, в моніторинг навколишнього середовища, в носимі електронні пристрої та багато інших, що вимагають гнучких матеріалів для розширення області їх застосування [4, 5]. Оскільки 3D друк отримав широке визнання у галузі виготовлення сенсорів, дослідження набуло швидкості у пошуку гнучких матеріалів, які можна легко включити в сенсори, щоб надати гнучкість цим пристроям. В основному, гнучкість системи безпосередньо пов’язана з її гнучкими компонентами.

У останні роки розвиток технологій збільшив різноманіття методів друку 3D, які використовуються як у комерційних, так і у наукових дослідженнях. Розвиток основних процесів 3D-друку, таких як powder bed fusion (PBF), vat polymerization (VP), material extrusion (ME), direct energy deposition (DED), material jetting (MJ), sheet lamination (SL) та binder jetting (BE), значно просунувся вперед [6]. Новітні методи дозволяють використовувати 3D-друк у виготовленні гнучких сенсорів. При аналізі опублікованих робіт за останні роки одним з найпоширеніших методів виготовлення 3D друківаних гнучких сенсорів є метод цифрового світлового проектування (DLP) [7]. Надруковані таким методом сенсори можуть бути використані в різних застосуваннях, від загальних сенсорів до складних мініатюрних сенсорів, які можуть використовуватися всередині людського тіла.

Цифрове світлове проектування (digital light processing DLP) – це технологія 3D друку, також відома як техніка полімеризації в ємності (vat polymerization), яка використовує термореактивні смоли для виготовлення деталей. Матеріали, які використовуються в DLP, схожі на полікарбонати, які забезпечують кращий термічний опір і відмінну міцність, матеріали типу поліпропілену використовуються через його високу стійкість, також використовуються фотоеластомери через їх велике подовження та наповнювачі, такі як кераміка або частинки, що забезпечують кращі температури зміщення тепла. У DLP використовується джерело світла (дугова лампа з LCD-панеллю), щоб затверджувати полімерну смолу, яка наноситься шар за шаром з високою роздільною здатністю. Процес друку DLP базується на двох підходах: знизу вгору та зверху вниз (рис.1).

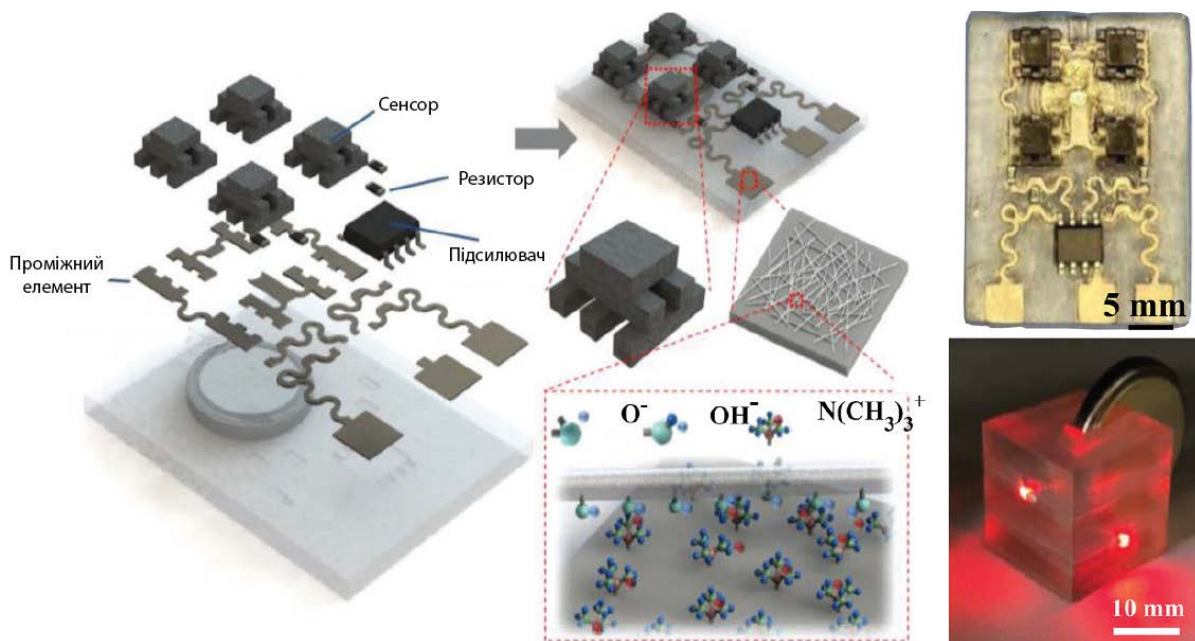


Рис. 1. Схематичне зображення 3D-друку біосенсорів методом DLP

Основні компоненти DLP – це джерело світла, платформа для друку та додаткове джерело для процесу затвердження. Платформа для друку занурена у ємність з рідинною смолою, де джерело світла проектує кожен з шарів. Це світло робить смолу твердою, і на платформі утворюються перші надруковані шари. Як тільки виконано побудову шар за шаром, платформа виймається з ємності для обробки, і процес повторюється. Переваги техніки DLP включають: високу масштабованість, швидкість та можливість налаштування робочих умов. Застосування методу DLP включає також мікродзеркала, які відображають світло і надають кольору екрану, а також м'які пневматичні приводи. У техніці 3D друку методом DLP процес «знизу вгору» виробляє структури малих розмірів з високою швидкістю та кращою роздільною здатністю. Рис. 1 демонструє виготовлення гнучкого масиву сенсорів тиску за допомогою техніки DLP. DLP – це техніка, яка базується на методі мікростереолітографії, без будь-яких опорних матеріалів вона затверджує смолу шар за шаром за кілька секунд. У DLP використовуються різні фотополімерні матеріали як матеріал для друку, і контролюються умови друку DLP; а саме – час затвердження, концентрація та товщина шару, що модифікують 3D-структури.

Центрифугальне багатоматеріальне 3D-друкування, ще один метод, який базується на техніці DLP, і використовується для виробництва великого об'єму кількох 3D-зображень з налаштовуваними

параметрами. Цей метод має потенціал для виготовлення пристроїв на основі кераміки. DLP є найефективнішим і досить дешевим методом, подібним до техніки FDM, де міститься проектор з високою роздільною здатністю, що виробляє світло на платформі для побудови у вигляді схожої форми деталі шару та надає більше детальності деталі при друку порівняно з іншими методами 3D-друку. Друк за допомогою техніки DLP має кращі показники через низьку ціну, збільшення швидкості виробництва, можливості виготовлення з високою швидкістю та високу роздільну здатність. Однак техніка DLP при використанні фотополімерів на плавлення може виділяти запахи. Таким чином, вибір матеріалу є найбільш складною частиною для техніки DLP. Основними параметрами, на які слід зосередитися, є температура ємності та сопла, а також швидкість екструзії.

Висновки

Гнучкі сенсори, виготовлені за допомогою 3D-друку, мають значний вплив на галузь носимої електроніки. Виробництво сенсорів змінилося з важких, часомірних традиційних методів на швидкі, недорогі та надійні методи адитивного виробництва з появою технології 3D-друку. У цьому огляді було надано найбільш актуальні розробки у виробництві гнучких 3D-друкованих сенсорів для біомедичних застосувань. Тепер сенсори можуть бути застосовані на складних та вроджених геометричних структурах, які раніше були неможливо виготовити за допомогою традиційних методів. Одним із ключових висновків є те, що метод DLP дозволяє створювати біосенсори з різноманітними характеристиками, такими як величина, форма та матеріал, що використовується. Це робить його вкрай гнучким та адаптивним для вирішення конкретних завдань досліджень та практичних застосувань. З постійними досягненнями в галузі технології 3D-друку можна передбачити зростання використання 3D-друку для виготовлення гнучких сенсорів у наступні роки. Це може призвести до збільшення обсягу та гнучкості застосування, зробивши цю область цікавою як для комерційних, так і для академічних досліджень.

Література

1. Y. Ni, R. Ji, K. Long, T. Bu, K. Chen, S. Zhuang, A review of 3D-printed sensors, *Appl. Spectrosc. Rev.* 52 (2017) 623–652, <https://doi.org/10.1080/05704928.2017.1287082>.
2. N. Wen, L. Zhang, D. Jiang, Z. Wu, B. Li, C. Sun, Z. Guo, Emerging flexible sensors based on nanomaterials: recent status and applications, *J. Mater. Chem. A* 8 (2020) 25499–25527, <https://doi.org/10.1039/d0ta09556g>.
3. E.M. Sefene, State-of-the-art of selective laser melting process: a comprehensive review, *J. Manuf. Syst.* 63 (2022) 250–274, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>.
4. Тензосенсорна рукавиця для людей з порушенням мовлення / Сілі І.І., Азархов О.Ю., Єфременко Б.В. - Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 25 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2023. – 159 – 167 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990252023286737>.
5. Електронна система виміру деформацій пілону протезних систем / О. Ю. Азархов, І. І. Сілі, Б. В. Єфременко // Науковий вісник ТДАТУ. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 2. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/435> DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-40.
7. T. Han, S. Kundu, A. Nag, Y. Xu, 3D printed sensors for biomedical applications: a review, *Sens. Switz.* 19 (2019), <https://doi.org/10.3390/s19071706>.
8. T. Xiao, Y. Chen, Q. Li, Y. Gao, L. Pan, F. Xuan, All digital light processing-3D printing of flexible sensor, *Adv. Mater. Technol.* 8 (2023) 2201376, <https://doi.org/10.1002/admt.202201376>.