

О. М. Рощенко

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ У ПРОМИСЛОВОСТІ: ЗАГАЛЬНИЙ АСПЕКТ

старший науковий співробітник Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна, [lx.toto@gmail.com](mailto:lx.toto@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>, AAN-7001-2021

У статті досліджено інноваційні технології 3D друку у промисловості. Розкрито принципи адитивного виробництва в умовах сучасності. Проаналізовано основні проблеми впровадження 3D друку, розкрито його сутність, а також виділено основні переваги та недоліки. Наголошується, що під 3D друком розуміють процес створення 3D об'єктів за допомогою спеціального принтера, тобто це комп'ютерне моделювання чи альтернативне конструювання, яке передбачає процес відтворення реального об'єкта на зразок 3D моделі. Детально охарактеризовано всі наявні методи 3D друку та здійснено їх порівняльну характеристику щодо принципу дії, використовуваних матеріалів, переваг та певних обмежень. Підкреслено, що цифрове моделювання ескізів для 3D друку, має певні проблеми зумовлені потребою у захисті даних, збереженні їхньої цілісності розробки та подальшої передачі до місця виробництва деталей. Зазначається, що надзвичайно важливо здійснювати контроль деталей, що формуються з використанням адитивних технологій, на наявність дефектів. В силу особливостей фізичних процесів, що відбуваються при формуванні таких виробів, у них можуть виникати не тільки дефекти, які зазвичай властиві застосовуваним матеріалам, а й поля механічних напруг. Наголошено, що, на сьогодні, адитивні технології мають величезний потенціал щодо зниження енергетичних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції, від галузі будівництва, транспорту та цифрових технологій, до медицини, продуктів харчування, одягу, тощо. Незважаючи на багато позитивних особливостей 3D-друку, впровадження даної технології в Україні ще не досягло значного рівня. У роботі наголошується на низці проблем, таких як проектування та розробка українських аналогів інструментарію 3D-друку і фізичні особливості самої технології виробництва. Зазначається, що на сьогодні існує потреба у створенні моделей українських пристроїв 3D-друку, у розробці методів контролю та загальній системі національних стандартів.

Ключові слова: 3d друк, інновації, методи, адитивна технологія, промисловість, структура, інструмент, матеріал.

O. Roschenko

## INNOVATIVE 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN INDUSTRY: GENERAL ASPECT

Senior Researcher Ukrainian Scientific Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [lx.toto@gmail.com](mailto:lx.toto@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>, AAN-7001-2021

The article examines innovative 3D printing technologies in industry. The principles of additive manufacturing in modern conditions are revealed. The main problems of the implementation of 3D printing were analyzed, its essence was revealed, and the main advantages and disadvantages were highlighted. It is emphasized that 3D printing is understood as the process of creating 3D objects using a special printer, that is, it is computer modeling or alternative construction, which involves the process of reproducing a real object like a 3D model. All available 3D printing methods have been characterized in detail and their comparative characteristics have been carried out regarding the principle of action, materials used, advantages and certain limitations. It is emphasized that the digital modeling of sketches for 3D printing has certain problems caused by the need to protect data, preserve their development integrity and further transfer to the place of production of parts. It is noted that it is extremely important to control the parts formed using additive technologies for the presence of defects. Due to the peculiarities of the physical processes that occur during the formation of such products, they can have not only defects that are usually characteristic of the materials used, but also mechanical stress fields. It was emphasized that, today, additive technologies have a huge potential for reducing energy costs for the creation of a wide variety of products, from the field of construction, transport and digital technologies, to medicine, food, clothing, etc. Despite the many positive features of 3D printing, the implementation of this technology in Ukraine has not yet reached a significant level. The work emphasizes a number of problems, such as the design and development of Ukrainian analogues of 3D printing tools and the physical features of the production technology itself. It is noted that today there is a need to create models of Ukrainian 3D printing devices, to develop control methods and a general system of national standards.

Key words: 3d printing, innovation, methods, additive technology, industry, structure, tool, material.

**Вступ та постановка проблеми.** Останні досягнення в області 3D-друку дозволяють промисловцям і дослідникам створити абсолютно нову основу для майбутнього виробництва. Яка сформує багатоматеріальне підґрунття для 3D-друку та забезпечить підтримку різних властивостей матеріалів, які можна надрукувати, як наслідок, це може призвести до підвищення продуктивності, розширення областей застосування, таких як аерокосмічна промисловість, біододатки, матеріали для космічних кораблів, електронні компоненти, тощо. Багатоматеріальна основа складається з низки компонентів, таких як полімери, кераміка, метали та біоматеріали, які

використовуються в кількох техніках адитивного виробництва для створення багатоматеріальних структур. У цьому матеріалі в межах одного компонента є можливість досягти таких властивостей, як твердість, стійкість до корозії, підвищенні властивості розтягування та стиску, а також усунути потребу у складному виробництві та дорогому інструменті. Новітні процеси сучасного 3D-друку з урахуванням застосування кількох матеріалів можна об'єднати в одну деталь, усуваючи потребу в моделюванні з кількох частин. Друк на базі низки матеріалів може забезпечити покращені характеристики, включаючи контрольовану анізотропію матеріалу, що може бути важливим для функціональних систем, таких як ті, що потребують вирівнювання поверхні, але мають високу навантажувальну здатність. Саме тому, необхідним є структуризація сучасних методів друку, їх глибоке розуміння враховуючи труднощі зв'язування та використання методів 3D-друку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підхід наукової спільноти до розгляду питань застосування технології 3d друку в усіх сферах сучасного життя формувався на протязі багатьох років.

Викладений у [1] матеріал надає практичні рекомендації, щодо використання адитивних технологій в процесах реставрації та відтворенні елементів архітектурного декору для розробки точних цифрових моделей та виготовлення майстер-форм для лиття копій втрачених чи пошкоджених архітектурних раритетів.

О. В. Муравйов, Ю. М. Гижник, В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, К. М. Серий [2] здійснили порівняльний аналіз існуючих технологій 3D-друку із зазначенням областей застосування, основних можливостей і короткого опису принципів роботи. Виявлено найбільш перспективні в найближчому майбутньому області застосування адитивних технологій та основні тенденції їх удосконалення.

У роботі [3] Г. О. Андрощук визначив адитивні технології, перспективи і проблеми 3D-друку. Автором наведено економічний аналіз щодо використання АМ-технологій у провідних країнах світу.

У [4] наведено короткі характеристики найбільш популярних видів пластика, що застосовуються у FDM-технології 3D друку та докладно наведені особливості налаштування програми-слайсера для практичного використання.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Pal Rahul, Pandey Prachi, Chanana Arsh, Singh Ravindra, Waheed Saman, Katiyar Aparna [5], Harasym Joanna [6], Nofar M.Reza, Utz Julia, Geis Nico, Altstädt Volker, Ruckdäschel Holger [7], Bao Yinyin, Paunović Nevena, Leroux Jean-Christophe [8], Zoabi Adeeb, Redenski Idan, Oren Daniel, Kasem Adi, Zigron Asaf, Daoud Shadi, Moskovich Liad, Kablan Fares, Srouji Samer [9], Pezzana Lorenzo, Wolff Raffael, Melilli Giuseppe, Guigo Nathanaël, Sbirrazzuoli Nicolas, Stampfl Jurgen, Liska Robert, Sangermano Marco [10], Luo Cihui, Liu Lingxiao, Huang Yu, Lou Xiaoding, Xia Fan, Song Yanlin [11], Morales María, Maranon Alejandro, Hernandez Camilo, Michaud Véronique, Porras Alicia [12], Li Yun, Li Bo [13], Sardelli Lorenzo, Tunesi Marta, Briatico Vangosa Francesco, Petrini Paola [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розкриття інноваційних технологій 3d друку залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

**Постановка завдання.** Дослідити інноваційні технології 3d друку у промисловості.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Враховуючи останні досягнення для конкретних функціональних потреб промисловості, орієнтованих на застосування, зростає потреба в інноваційних техніках, інструментах і технологіях виробництва, які використовуються для конкретних цілей. Сучасна техніка 3D-друку представила широкий вибір матеріалів або технік обробки, які можна застосовувати за різними напрямками.

У найближчому майбутньому потенціал складного багатоматеріального 3D-друку стане революційним моментом у швидкому виробництві, індивідуальному дизайні та структурних застосуваннях. Багатоматеріальний 3D-друк сумісний із функціонально сортованими матеріалами, які мають єдину структурну форму, а також має потенціал для використання в конструкційних додатках, щоб отримати переваги від гібридних/комбінованих характеристик матеріалів.

Вибір матеріалів для кінцевого використання у процесі реалізації операцій 3D-друку базується на доступності матеріалів та їх оброблюваності, властивостях матеріалу, техніці, яка використовується для друку, часу обробки та швидкості втрат матеріалу, модернізації та ремонтпридатності матеріалу, вартості, фізичних та хімічних властивостях кінцевого продукту, впливу зовнішніх умов, тощо.

Доступність матеріалів для широкого спектру застосувань є потенційною річчю при виборі кількох матеріалів. Це матеріали, які легко доступні та використовуються для загального застосування, які можна друкувати навіть на всіх типах принтерів, таких як PET – поліетилентерефталат, PA – поліамід, TPU – термопластичний поліуретан, PC – полікарбонат, HIPS – ударостійкий полістирол та багато інших. Останнім часом дослідження деталей/компонентів із багатьох матеріалів, виготовлених за допомогою 3D-друку, значно збільшилися. Використовуючи сучасний 3D-друк, можна створювати високоякісні компоненти шляхом підгонки різних шарів різних матеріалів до бажаної товщини. Завдяки цій унікальності окреслений процес виділяється порівняно зі звичайними методами виробництва. Отже, матеріали, які використовуються для 3D-друку, мають бути визначені на етапі проектування, на основі параметрів та властивостей. Різноманітні полімери, кераміка, метали та біоматеріали доступні для проектування та виготовлення компонентів із багатьох матеріалів за допомогою сучасного 3D-друку.

Полімерні композити, наповнені вуглецевими або скляними волокнами, деревні частинки (PLA матриця), пісковик (співполіефірна матриця), магнітні (PLA матриця з частинками заліза), електропровідні (PLA матриця з вуглецевими наповнювачами). Широко доступний фотополімер на основі гнучкого, жорсткого опорного матеріалу, який можна легко обробити на струменевих принтерах за допомогою методів моделювання осадження плавленням, які використовуються для виготовлення шарнірів.

3D-друк силіконових еластомерів у поєднанні з нанокремнеземом (NS) є одним із типів вдосконаленої структури наступного покоління, що має покращену продуктивність і низьку вартість виготовлення. Такі багатоматеріальні компоненти виготовляються за допомогою процесу Direct Ink Writing (DIW) і знаходять своє застосування в медичних пристроях, гнучкій електроніці та м'якій робототехніці. Силікони – це матеріали з низькою в'язкістю, які вимагають тривалого затвердіння під час процесів 3D-друку, але їхня приваблива еластичність робить їх придатними для вищезазначених областей. Щоб подолати ці проблеми з придатністю до друку, нанокремнезем додається в даний час до еластомерів у якості модифікатора реології, і це додавання не знижує еластичність еластомерів.

Поліетиленгліколь (ПЕГ) є гідрогелем з хорошою сумісністю з хімічними модифікаціями і використовується в основному в каркасах тканинної інженерії [15]. PEGX – желатинові багатоматеріальні компоненти, синтезовані за допомогою методів біочорнила, мають підвищену якість пошарового друку та надійність.

Останні досягнення в галузі людських імплантатів, особливо заміни кісток, зосереджені на розробці нового мультиматеріалу, який має хорошу міцність на стиск. Пропіленфумарат диметакрилат (PFDMA) є макромером, який має низьку в'язкість і володіє необхідними властивостями для утворення емульсії з високою внутрішньою фазою. PFDMA має хороші властивості, такі як біологічне розкладання та цитосумісність.

Механічні характеристики компонентів, виготовлених із використанням добавок із кількох матеріалів, часто перевищують характеристики друку з одного матеріалу. Утворення порожнеч у наступних шарах друкованих компонентів може вплинути на їхні механічні характеристики через зменшення міжфазної адгезії в друкованих шарах. Іншою типовою проблемою адитивного виробництва із застосуванням 3D-друку є різниця в механічній поведінці між горизонтальним натягом або стисненням і вертикальним натягом або стисненням. Надійні методи 3D-друку, такі як укладання мікродобавок, необхідні для забезпечення узгодженості шарів і підвищення якості поверхні відповідно до специфікацій.

Функціональні градієнтні цифрові композити також можуть бути створені та виготовлені з використанням 3D-друку з кількох матеріалів, що може підвищити ефективність виготовленого структурного дизайну, наприклад, метод оптимізації цифрового ламінатного композиту. Запропонований цифровий потік проектування може одночасно оновлювати як макромасштабну форму створеної конфігурації ламінату, так і вирівнювання коротких армованих волокон у топографії.

На початкових стадіях друк матеріалу обмежувався властивостями екструзії та технікою друку виросування, тому його було розширено до мультиматеріалу з дуже хорошою оброблюваною структурою. PVA – полівініловий спирт, ABS – акрилонітрилбутадієнстирол і PLA – полімолочна кислота були основними альтернативами на ранніх етапах, кожна з яких мала свій набір застосувань і функціональних властивостей. У той час як ABS відомий своїми механічними

якостями, PLA відомий своєю легкістю друку та відсутністю сильного запаху пластику або випарів. З іншого боку, PVA здебільшого використовувався для друку опорних структур, коли виріб містить підвісні частини. Порошкове сплавлення, екструзія та рідка полімеризація ґрунтуються на переходах порошок, рідина-тверде тіло або тверде тіло-рідина-тверде тіло [16]. У кожному секторі можна використовувати різні методи. Порошкове плавлення використовується в таких процесах, як селективне лазерне плавлення (SLM), селективне лазерне спікання (SLS) і плавлення електронним променем (EBM). Екструзія матеріалу є основою для моделювання плавленого осадження (FDM) (плавлення, а потім затвердіння матеріалу).

Трьома основними методами кубової полімеризації є цифровий синтез світла (DLS), цифрова обробка світла (DLP) і стереолітографія (SL). Незважаючи на те, що метод фотополімеризації в кубі не завжди дозволяє застосовувати багато матеріалів, завдяки його численним перевагам, таким як якість поверхні, точність розмірів і можливість друку на широкому діапазоні матеріалів, фотополімеризація в кубі була модифікована, щоб забезпечити можливість використання кількох матеріалів у друці [17].

Стереолітографія у ванній фотополімеризації використовує фотополімерну рідину як вихідний матеріал. Опускаючи будівельну платформу в чан і полімеризуючи її УФ-лазером, рідкий пластик шар за шаром перетворюється на 3D-об'єкт. Перевага цієї стереолітографії дозволяє створювати великі деталі з дуже високою точністю та обробкою поверхні.

Технологія цифрової обробки світлом (DLP) дуже схожа на стереолітографію, але використовує інше джерело світла та рідкокристалічний дисплей. У цьому випадку два чи більше цифрових пристроїв мікровіддзеркалення використовуються для доставки матеріалів із кількома чорнилами для додатків із кількома матеріалами.

Екструзію можна розділити на дві основні підгрупи залежно від температури, необхідної або відповідної для екструзії: виготовлення плавлених ниток (FFF) або моделювання плавленого осадження (FDM) для екструзії розплавлених термопластичних полімерів і пряме написання чорнилом (DIW) для екструзії без плавлення.

Технологія багатоструменевого моделювання (MJ) реалізується наступним чином: струменева друкуюча головка подає розплавлений віск на друкарський стіл. Цей метод дає перевагу отримати дуже високу точність і якість поверхні, але він працює лише з воскоподібними матеріалами.

На відміну від багатоструменевого моделювання поліструменевого працює по-іншому: друкуюча головка подає рідкі фотополімери на друкарський стіл. Матеріал швидко твердіє та цементується під дією УФ-світла, що дозволяє накладати шари один на інший.

Плавлення порошкового шару (PBF) – це техніка, яка ґрунтується на тій самій фундаментальній концепції, що й фрезерування, оскільки компоненти виготовляються шляхом додавання матеріалу, а не його видалення за допомогою традиційних процесів формування. Метод починається з розробки 3D-моделі CAD, яка чисельно розділена на багато різних шарів. Оскільки джерелом тепла зазвичай є промінь енергії, траєкторія сканування джерела тепла генерується для кожного шару, який визначає як граничний контур, так і певну послідовність заповнення, як правило, растровий шаблон.

Лазерне спікання (LS) та вибіркоче лазерне спікання (SLS) мають певні спільні риси. Лазер використовується для вибіркового розплавлення крихітного шару пластикового порошку. Компоненти шар за шаром накопичуються в шарі порошку.

Вибіркове лазерне спікання (SLS) – це метод адитивного виробництва, який використовує лазер як джерело енергії для спікання порошкоподібного матеріалу, автоматично направляючи лазер у точки простору, описаного 3D-моделлю, зв'язуючи матеріал разом, що створює тверду структуру.

Метод електронно-променевого плавлення використовує потужний електронний промінь для виробництва енергії, необхідної для високої потужності плавлення та продуктивності. Гарячий процес виробляє компоненти з мінімальною залишковою напругою, тоді як вакуум гарантує чисту та регульовану атмосферу. Скануючи концентрований електронний промінь для вибіркового розплавлення певних областей порошку, система EBM створює структури знизу вгору. Він бере дані з 3D-моделі CAD і наносить послідовні шари порошкоподібного матеріалу. Техніка повторюється до тих пір, поки не буде створено останній шар компонента. Це відбувається у вакуумі, що робить його придатним для виготовлення конструкцій з реактивних матеріалів, які не можуть викидатися в атмосферу. У системах екструзії матеріалів для одночасного друку

компонентів із кількох матеріалів зазвичай використовуються друкувальні головки з подвійним або кількома екструдерами.

Щодо переробки та повторного використання багатокомпонентних матеріалів на сьогодні проведено дуже мало досліджень. Армовані волокнами термопластичні композити є популярним мультиматеріалом, який можна переробляти та повністю відновлювати. Схема переробки матеріалів із замкнутим циклом для вуглецевого волокна та матриці була використана для безперервних FRTP, довгих FRTP, коротких FRTP і, зрештою, армованих порошком пластмас.

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз методів 3D-друку

№	Техніка	Принцип дії	Матеріал	Переваги	Обмеження
1	Моделювання осадження плавленням (FDM)	На основі екструзії	Термопластики (ABS, PLA, PC, PA тощо); скло (нове); евтектичний метал; кераміка; істивний матеріал тощо.	Просте використання та обслуговування; легкодоступний; багатоматеріальні конструкції; низька вартість	Шорстка поверхня; низька роздільна здатність; висока вартість (для скла та металу)
2	Пряме написання чорнилом (DIW)	На основі екструзії	Пластмаси, кераміка, харчові продукти, живі клітини, композити	Універсальність	Низька роздільна здатність; вимагає постобробки
3	Стереолітографічний апарат (SLA) і (цифровий світловий процес) DLP	Фотополімерія	Фотополімери	Висока точність; простий	Одиничний матеріал; небіологічно сумісний
4	Виробництво ламінованих предметів (LOM)	Ламінування	Листовий матеріал (папір, пластикова плівка, металеві листи, целюлоза тощо)	Універсальний; низька вартість; легко виготовляти великі деталі	Займе багато часу; обмежені механічні властивості; низька матеріаломісткість; конструктивні обмеження
5	Вибіркове лазерне спікання (SLS) і вибіркове лазерне плавлення (SLM)	Лазерне затвердіння на основі порошку	Порошковий пластик, метал, кераміка, ПК, ПВХ, ABS-віск, акриловий стирол тощо.	Висока точність; широка адаптація матеріалів; висока міцність	Обмежені механічні властивості; висока вартість
6	Струменевий фотополімер (Ployjet)	Струменевий	Рідкі фотополімери	Висока точність	Висока вартість
7	3D струмене зв'язання порошку (3DP)	Струменевий	Будь-який матеріал у формі частинок, гіпс, кераміка, цукор тощо.	Немає необхідності в допоміжних матеріалах; різнобічний; менша вартість; барвистий друк	Низька міцність; додаткова обробка поверхні; обмежені механічні властивості

Розробка нових і вдосконалених композитних матеріалів, які можна переробляти, а також виробничих процесів, які необхідні для майбутнього розвитку, щоб одночасно відповідати

характеристикам кінцевого використання та придатності до переробки є актуальним в умовах сьогодення.

**Висновки.** У роботі досліджено інноваційні технології 3d друку у промисловості. Адитивне виробництво із застосуванням низки різних матеріалів надає різні властивості матеріалу в одному компоненті, а також дозволяє об'єднувати кілька компонентів в один компонент. Багатофункціональні 3D-компоненти мають глобальний потенціал для впровадження в кількох галузях, включаючи біомедичну інженерію, програмну робототехніку, електроніку, просторові та аерокосмічні програми. Незважаючи на значні вдосконалення технологій 3d друку, за останні кілька років, існує багато невирішених проблем, таких як низька продуктивність, погана масштабованість і обробка поверхні, обмежений вибір матеріалів, високе перехресне забруднення та низький міжфазний зв'язок між різними матеріалами. На додаток до цього також необхідні фундаментальні наукові знання матеріалознавства, кінетики та механіки, які необхідні для сприяння та вдосконалення досліджень адитивного виробництва. Оскільки складність обробки швидко зростає через різноманітність використовуваних матеріалів, необхідно звернути увагу на створення нових виробничих продуктів і нових досягнень у передовому виробництві. Вплив на виробничий сектор промисловості за допомогою нових проривів у розробці технологій 3D-друку, ґрунтується на знаннях про розуміння різноманітних матеріалів і зв'язувальних сил, а також інструментального вдосконалення технології.

Перспективами подальшого дослідження є розробка універсального методу 3D-друку із застосуванням перехресної технології багато матеріального впливу.

### Література

1. Лебедева, О. О. Адитивні технології в реставрації та відтворенні елементів архітектурних об'єктів / О. О. Лебедева, О. М. Гумен // Збірник доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених», м. Київ, Київ, 2017. С. 269-274.
2. Муравйов, О. В. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О. В. Муравйов, Ю. М. Нижник, В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, К. М. Серий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2021. Том 32 (71), №5. С. 114-119.
3. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68-77. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/STI\\_2017\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/STI_2017_1_12).
4. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.
5. Pal Rahul, Pandey Prachi, Chanana Arsh, Singh Ravindra, Waheed Saman, Katiyar Aparna. (2023). Recent Approaches on 3D Printing (3DP) in Pharmaceuticals as Dominance Role in Traditional Formulation. № 8. P. 989.
6. Harasym Joanna. (2023). 3D Printers for Food Printing -Advantages and Drawbacks of Market Ready Technical Solutions. № 38. P. 41-59.
7. Nofar M.Reza, Utz Julia, Geis Nico, Altstädt Volker, Ruckdäschel Holger. (2022). Foam 3D Printing of Thermoplastics: A Symbiosis of Additive Manufacturing and Foaming Technology. *Advanced Science*. № 9. DOI: 10.1002/advs.202105701.
8. Bao Yinyin, Paunović Nevena, Leroux Jean-Christophe. (2022). Challenges and Opportunities in 3D Printing of Biodegradable Medical Devices by Emerging Photopolymerization Techniques. *Advanced Functional Materials*. № 32. P.210-264. DOI: 10.1002/adfm.202109864.
9. Zoabi Adeeb, Redenski Idan, Oren Daniel, Kasem Adi, Zigran Asaf, Daoud Shadi, Moskovich Liad, Kablan Fares, Srouji Samer. (2022). 3D Printing and Virtual Surgical Planning in Oral and Maxillofacial Surgery. *Journal of Clinical Medicine*. №11. P. 23-85. DOI: 10.3390/jcm11092385.
10. Pezzana Lorenzo, Wolff Raffael, Melilli Giuseppe, Guigo Nathanaël, Sbirrazzuoli Nicolas, Stampfl Jurgen, Liska Robert, Sangermano Marco. (2022). Hot-lithography 3D printing of biobased epoxy resins. *Polymer*. № 254. P. 125-197. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125097.
11. Luo Cihui, Liu Lingxiao, Huang Yu, Lou Xiaoding, Xia Fan, Song Yanlin. (2022). Recent Advances in Printable Flexible Optical Devices: From Printing Technology and Optimization

- Strategies to Perspectives. The Journal of Physical Chemistry Letters. № 13. P. 12061-12075. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.2c03153.
12. Morales María, Maranon Alejandro, Hernandez Camilo, Michaud Véronique, Porras Alicia. (2023). Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments. *Polymers*. № 15. P. 528. DOI: 10.3390/polym15030528.
13. Li Yun, Li Bo. (2022). Direct ink writing 3D printing of polydimethylsiloxane-based soft and composite materials: A mini review. *Oxford Open Materials Science*. № 2. DOI: 10.1093/oxfmat/itac008.
14. Sardelli Lorenzo, Tunesi Marta, Briatico Vangosa Francesco, Petrini Paola. (2021). 3D- Reactive printing of engineered alginate inks. *Soft Matter*. № 17. DOI: 10.1039/D1SM00604E.
15. Берладір Х. В. Біомедичні матеріали: від історії до сьогодення : навчальний посібник / Х. В. Берладір, Т. П. Говорун, О. М. Олешко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. 223 с.
16. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 91 с.
17. Poudel Laxmi, Marques Lucas, Williams Robert, Hyden Zachary, Guerra Pablo, Fowler Oliver, Sha Zhenghui, Zhou Wenchao. (2022). Toward Swarm Manufacturing: Architecting a Cooperative 3D Printing System. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. № 144. P. 1-11. DOI: 10.1115/1.4053681.