

# АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, М.Г. Кораб

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

В роботі проведено аналіз сучасного стану 3D технологій полімерних матеріалів, який базується на публікаціях, представлених як у відкритих джерелах, так і широкому спектрі науково-технічних журналів, а також власному досвіді авторів в області 3D-друку термопластичними та термореактивними полімерами. Розглянута історія виникнення адитивних технологій, сучасний стан та тенденції розвитку ринку тривимірного друку. Запропонована класифікація найбільш поширених у світі технологій адитивного виробництва виробів з полімерних матеріалів в залежності від методів переробки пластмас та наведено їх короткий опис, представлені їхні особливості, переваги та недоліки. Бібліогр. 27, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* адитивні технології, 3D-друк, полімерні матеріали

Сучасні темпи розвитку промисловості вимагають вибору технологій виробництва, які можливо реалізувати в найкоротші терміни при залученні мінімальних грошових вкладень з отриманням в результаті якісної продукції. Цим вимогам на сьогоднішній день відповідають адитивні технології (Additive Manufacturing, Additive Fabrication або AM-, AF-technologies), які знаходять все більше застосування в усіх сферах життєдіяльності людини і є одним з найбільш цікавих і перспективних напрямків промислового виробництва [1, 2]. Адитивні технології також називають технологіями пошарового синтезу, 3D-друком, 3D технологіями, швидким прототипуванням, пошаровим моделюванням, цифровим виробництвом тощо.

Під узагальненим терміном «адитивні» прийнято розуміти групу технологій, які дозволяють пошарово створювати тривимірні об'єкти на основі даних CAD (Computer-Aided Design) моделі поступовим додаванням вихідного матеріалу на майбутній виріб, що відрізняється від традиційних методів формування деталі, коли з масиву заготовки видаляється зайвий матеріал шляхом механічної обробки. CAD модель – створений цифровий макет об'єкта, який має бути сформований з використанням адитивних технологій на 3D-принтері. Тривимірну CAD модель можна як розробити за власним дизайном методом комп'ютерного проектування, так і створити за даними, зібраними за допомогою 3D-сканера.

Суть адитивного виробництва (Additive Manufacturing (AM)) може бути проілюстрована наступним чином.

Ключовим є те, що 3D-друк істотно скорочує тривалість технологічного ланцюга від ідеї або креслення до виробу, а разом з тим скорочується і трудо-, матеріало- та енергоємність виробництва.

Таким чином, адитивне виробництво дає можливість створювати кінцеві функціональні вироби безпосередньо від конструктора або інженера через комп'ютер і принтер, не застосовуючи при цьому додаткових технологічних операцій.

Хоча 3D-друк прийнято вважати одним з головних відкриттів XXI століття, в дійсності адитивні технології з'явилися ще в 1984 р., коли американський дослідник Чарльз Халл (Charles W. Hull), засновник компанії 3D Systems, розробив технологію пошарового «виросування» фізичних тривимірних об'єктів з фотополімерної композиції [3]. Технологія отримала назву «стереолітографія» (STL). Патент на свій винахід автор отримав тільки у 1986 р., а рік по тому, інженер представив громадськості розроблений ним промисловий пристрій для тривимірного друку [4]. Оскільки термін «3D принтер» з'явився лише у 1993 р., апарат Чарльза Хала отримав назву «установка для стереолітографії». Приблизно в той же час почали розвиватися і інші технології 3D-друку. У 1985 р. Михайлом Фейгенмом (Michael Feuygin) була запропонована технологія ламінування LOM (Laminated Object Manufacturing), яка дозволяє скріплювати окремі шари матеріалу за допомогою нагрітого до певної температури спеціального валика [5]. У 1986 р. Карл Декард (Carl Decard), співробітник Техаського університету, подав заявку на патент, що описує процес швидкого прототипування виробів за допомогою технології селективного лазерного спікання SLS (Selective Laser Sintering) [6], суть якого полягає в пошаровому спіканні порошкового матеріалу лазерним променем. У 1989 р. Скотт Крамп (Scott Crump), пізніше засновник компанії Stratasys, заявив про розробку технології пошарового наплавлення (FDM – Fused Deposition Modeling) [7]. При використанні даної

О.П. Масючок – <https://orcid.org/0000-0002-3302-3079>, М.В. Юрженко – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>,

Р.В. Колісник – <https://orcid.org/0000-0002-0493-894X>, М.Г. Кораб – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>

© О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, М.Г. Кораб, 2020

технології формування об'єкта здійснюється шляхом пошарового укладання, іншими словами наплавлення, розплавленої нитки з термопластичного матеріалу, яка видавлюється через екструзійну головку на охолоджувану платформу. Далі процес розвитку нових технологій та вдосконалення вже наявних пішов з прискоренням і в 1993 р. назрів переломний момент, який зробив адитивні методи виготовлення продукції загальнодоступними, а термін «3D-друк» відомим по всьому світу. Студенти Массачусетського технологічного інституту Джим Бредт і Тім Андерсон, які працювали над дисертацією, що була присвячена створенню струйного друку на основі порошкової технології, впровадили технологію пошарового синтезу матеріалу в корпус звичайного настільного принтера [8]. У 1995 р. Тім і Джим організували компанію Z Corporation, яка і вивела на ринок дану технологію. У 2012 р. технологію разом з компанією придбала корпорація 3D systems. Сьогодні по всьому світу під її брендом продаються колишні моделі Z Corporation.

У наш час ринок тривимірного друку стрімко зростає і поповнюється новими моделями унікального виробничого обладнання, можливості якого майже безмежні. Надруковані деталі і вузли літаків, надрукований корпус автомобіля, надрукований житловий будинок, надрукований одяг, надруковані медичні імпланти – це далеко не весь перелік досягнень сучасних адитивних технологій. Однак найцікавіше, що друкувати можна практич-

но будь-якими матеріалами: полімерами, інженерними пластиками, композитними порошками, різними типами металів, керамікою, піском, бетоном, деревом, а в останній час навіть їжею і біологічними речовинами [9–11]. За рахунок доступності та практичності 3D-друк різними типами пластика є найбільш поширеним на сьогоднішній день.

Усі технології 3D-друку пластиком (таблиця) засновані на чотирьох основних методах переробки полімерних матеріалів, які використовуються у промисловості для виробництва виробів з пластмас: екструзія, фотополімеризація, гранулювання та ламінування.

Найбільш поширеними технологіями 3D-друку, які застосовуються в побуті (в офісних умовах) і промисловості є: формування виробів методом пошарового наплавлення (FDM) і стереолітографія (SLA). Але, тим не менше, кожна зі згаданих вище технологій знаходить свого споживача, а також має переваги і особливості, які викликають інтерес. Розглянемо кожен технологію 3D-друку більш детально.

**FDM/FFF 3D-друк.**

Моделювання методом пошарового наплавлення FDM – є найпоширенішою технологією 3D-друку в світі, на основі якої працюють мільйони 3D-принтерів – від найдешевших до промислових систем тривимірного друку. Для створення виробів методом FDM 3D-друку використовується філамент з різних термопластичних матеріалів, які поставляються у вигляді котушок. Філамент

**Основні методи та технології адитивного виробництва з полімерних матеріалів**

Метод формування 3D виробів	Технологія 3D-друку	Суть технології або принцип створення 3D об'єктів
Екструзійний	Моделювання методом пошарового наплавлення (Fusing Deposition Modeling, FDM) або виробництво методом наплавлення ниток (Fused Filament Fabrication, FFF)	Послідовне нанесення шарів розплавленого термопластичного полімерного матеріалу, які відтворюють контури цифрової моделі
Фотополімеризація	Стереолітографія (Stereolithography, SLA або SL)	Використання фотополімерних смол, які тверднуть під дією ультрафіолетового випромінювання
	Цифрова світлодіодна проєкція (Digital Light Processing, DLP)	Використання фотополімерних смол, які тверднуть при засвічуванні цифровим світлодіодним проєктором (DLP)
	Polyjet Багатоструменеве моделювання (Multi Jet modeling, MJM)	Пошарове тверднення рідкого фотополімерного матеріалу під дією ультрафіолетового випромінювання
Гранулювання	Вибіркове лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS)	Послідовне спікання шарів порошкового матеріалу за допомогою лазерів високої потужності
	Вибіркове теплове спікання (Selective Heat Sintering, SHS)	Плавлення шарів термопластичного порошку за допомогою теплового випромінювача
	Кольоровий струменевий друк (Color Jet Printing, CJP) (раніше технологія мала назву Three-Dimensional Printing – 3DP)	Пошарове склеювання і фарбування композитного порошку на основі пластику
Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM – Laminated Object Manufacturing) або ламінування пластикових листів (PSL – Plastic Sheet Lamination)	Пошарове склеювання пліткових матеріалів з подальшим формуванням (вирізуванням) моделі за допомогою лазерного променя або ріжучого інструмента

може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3 мм в залежності від специфікації принтера [12].

Як і у всіх технологіях 3D-друку, першим кроком на шляху до виготовлення фізичного об'єкта є побудова його цифрової 3D-моделі. 3D-модель у форматі STL передається в програмне забезпечення 3D-принтера. Програма автоматично (або оператор вручну) розміщує модель у віртуальному просторі робочої камери. Потім програма за необхідністю розраховує елементи допоміжних конструкцій – підтримуючі структури під нависаючі елементи об'єкта і проводить розрахунок необхідної кількості витратного матеріалу, а також часу «виращування» прототипу. Перед запуском процесу друку модель автоматично розділяється на горизонтальні шари і проводиться розрахунок шляхів переміщення екструдера (друкуючої головки) – пристрою, який оснащено механічним приводом для подачі філаменту, нагрівальним елементом для його плавлення і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія – виштовхування розплавленого полімерного матеріалу на поверхню виробу (рис. 1, а).

Отримані настройки зберігаються, модель конвертується в керуючий код для 3D принтера. Потім філамент з котушки розмотується для введення у екструдер і запускається процес безпосередньо 3D-друку: екструдер розплавляє філамент і з високою точністю подає розплав полімерного матеріалу тонкими шарами на робочу поверхню 3D принтера у відповідності до алгоритму друку та CAD 3D-моделі. Після нанесення шару полімерний матеріал охолоджується і затвердіває, а платформа, на якій формується об'єкт, опускається на величину, рівну товщині шару, що наноситься. Рух в 3-х площинах голівки і платформи (рис. 1, б) задається алгоритмом, розробленим заздалегідь за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Після завершення процесу побудови виробу допоміжні конструкції видаляються (вручну або розчиняються в спеціальному розчині), а готовий ви-

ріб може бути використано в надрукованому вигляді або піддано будь-якого способу подальшої обробки.

Основні переваги FDM 3D-друку: простота використання і відсутність спеціальних вимог до приміщення (придатність для застосування в офісі); низька вартість FDM-принтерів і витратних матеріалів; можливість використання великого асортименту типів пластика, в залежності від потреб і кольорів.

Основні недоліки технології: для нависаючих елементів необхідним є створення підтримуючих структур, які після завершення друку доводиться видаляти; невелика роздільна здатність, що призводить до шаруватості поверхні виготовленої моделі; можлива наявність термічної усадки, яка призводить до зміни розмірів виробу після охолодження.

### SLA 3D-друк.

Стереолітографія є не тільки однією з перших 3D технологій адитивного виробництва в світі, але й однією з найбільш прецензійних [14–16]. Саме тому вона найбільш затребувана у медичній сфері, наприклад, для виготовлення імплантів і т. д. Як витратний матеріал в ній застосовується рідка фотополімерна смола. Під впливом лазерного випромінювання на ті ділянки фотополімера, які відповідають стінкам заданого об'єкта, відбувається їх пошарове тверднення і формування готового виробу.

SLA 3D-друк, як і друк методом FDM, паралельно з побудовою об'єкта вимагає використання підтримуючих конструкцій, які служать для кріплення частини виробу до основи платформи і запобігають деформації виготовленої моделі при наявності в ньому нависаючих елементів. Існує дві базові конструкції стереолітографічних 3D-принтерів: класична, яка застосовується частіше в промислових пристроях, і так звана «3D друк SLA вгору-ногами», яка менш поширена і зустрічається в основному в настільних 3D-принтерах.

У класичному варіанті SLA 3D-принтера лазер розташований зверху, а робоча платформа

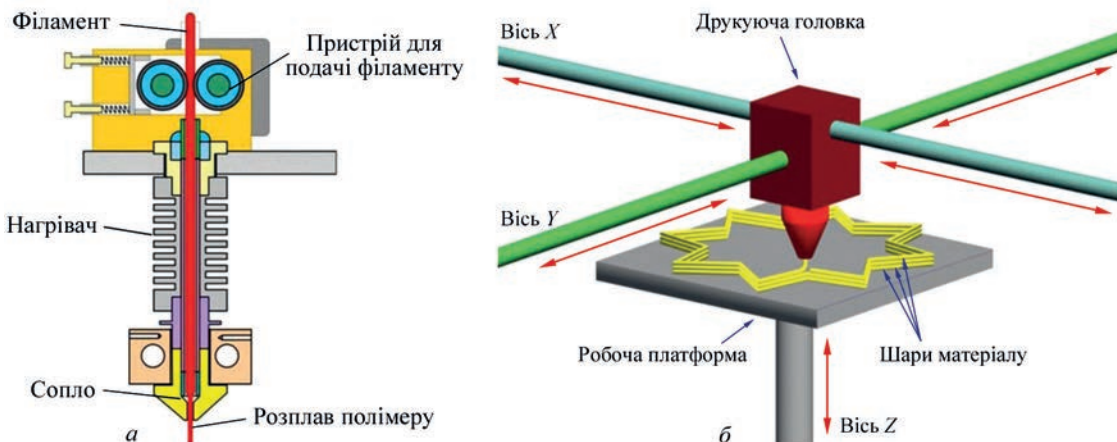


Рис. 1. Схема екструдера FDM 3D-принтера (а) і процесу створення ним тривимірної моделі (б) [13]



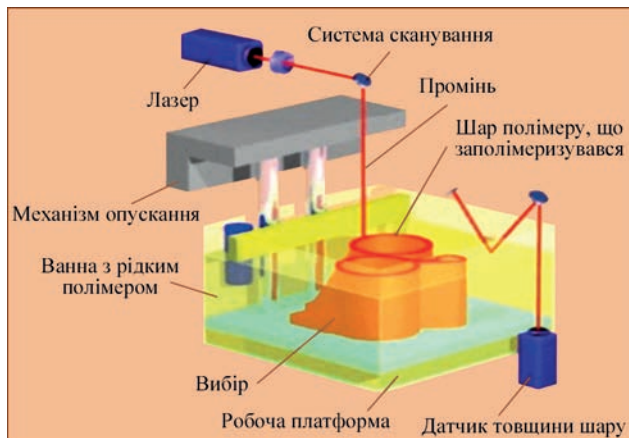


Рис. 2. Схема процесу SLA 3D-друку [17]

поступово опускається вниз (рис. 2). У резервуар, в який налита спеціальна рідина (суміш фотополімеру і реагента-твердника), що за зовнішнім виглядом нагадує епоксидну смолу, занурюється сітчаста платформа на глибину не більше 0,05...0,13 мм (саме такою є товщина одного шару). Після цього активується лазер, в результаті впливу якого на певні ділянки матеріалу рідина твердне і прилипає до платформи. Таким чином 3D-принтер створює перший шар виробу. Кожен шар являє собою 2D зображення, яке викреслюється лазером, згідно з даними, закладеними в тривимірній цифровій моделі. Далі платформа опускається на один крок, рівний товщині одного шару, вниз (по координаті Z) і після вирівнювання поверхні рідкого матеріалу лазер знову активується, продовжуючи побудову наступного шару по координатних осях X-Y. Цикли формування шарів повторюються до побудови виробу.

Принцип процесу 3D-друку, який застосовується в настільних 3D-принтерах, ідентичний, з тією лише різницею, що лазер розташований під ємністю з фотополімером, а при побудові виробів платформа не опускається, а поступово піднімається вгору.

Загальним для обох варіантів є необхідність промивання виробу в спеціальних розчинах по завершенню 3D-друку, а також його опроміненню ультрафіолетовим світлом. Перше потрібно для остаточного очищення виготовленої моделі від залишків фотополімера, а друге для повного затвердіння виробу.

Основні переваги SLA 3D-друку: висока точність побудови готового виробу; отримана модель має високу міцність на стиск і витримує температурний вплив до 100 °С; можливість виготовлення складних моделей зі збереженням дрібних елементів декору; невелика кількість відходів; великий вибір витратних матеріалів.

Основні недоліки технології: масивність обладнання (великі габарити і вага); висока вартість обладнання та витратних матеріалів; відсутність

можливості використання в одному циклі різних матеріалів; усадка матеріалу при твердненні, внаслідок чого, низька міцність на вигин і удар; необхідність в ультрафіолетовій обробці виробу після друку.

### DLP 3D-друк.

На основі методу SLA 3D-друку розроблено кілька інших методів адитивних технологій, одним з яких є DLP 3D-друк. Різниця між цими методами полягає в тому, що замість лазера в DLP 3D-принтерах використовується цифровий світлодіодний проєктор, який засвічує цілий шар одночасно, а не поступово, як лазер в стереолітографії [18, 23]. Вважається, що за рахунок цього DLP друк дозволяє відтворювати об'єкти швидше. Однак ця різниця не настільки велика, щоб витіснити SLA 3D-принтери з ринку 3D-друку.

Як і в SLA технології, існує два варіанти пристроїв для DLP 3D-друку: в одному побудова об'єкта відбувається знизу-вгору (робоча платформа опускається), в іншому навпаки – побудова об'єкта відбувається зверху-вниз (робоча платформа піднімається).

Основні переваги DLP 3D-друку: більш висока швидкість друку порівняно з SLA 3D-принтерами; висока точність друку; великий вибір витратних матеріалів; доступна ціна обладнання за рахунок використання в принтерах DLP проєкторів, які набагато дешевше лазерних установок (як в SLA).

Основні недоліки технології: точність друку поступається точності при SLA 3D-друку і залежить не тільки від 3D-принтера, але і від використаного матеріалу (чим він більше наповнений пігментами і блокаторами світла, тим більш точними будуть надруковані з нього вироби) і навколишнього середовища (під час полімеризації саме в DLP принтерах виділяється багато тепла, що призводить до прискорення хімічних реакцій); необхідність у додатковому опроміненні виробу після друку, для остаточного затвердіння.

### Багатоструменевий 3D-друк (PolyJet та MJM 3D-друк).

3D-друк за технологією PolyJet та MJM за ознаками нагадує друк звичайним струменевим 2D-принтером, але замість використання чорнил відбувається пошарове наплення рідких світлочутливих полімерних матеріалів на спеціальній внутрішній площадці з подальшим опроміненням кожного нанесеного шару ультрафіолетовою лампою [19, 23]. Технології MJM і PolyJet практично не відрізняються один від одного. Різниця в назвах відбувається із-за відповідних патентів: технологія Multi Jet Modeling належить компанії 3D Systems, а PolyJet – конкуруючій компанії Stratasys.

За допомогою оснащеної соплами друкуючої головки, з якої тонкими шарами розпоршується рідкий витратний матеріал: матеріал моделі

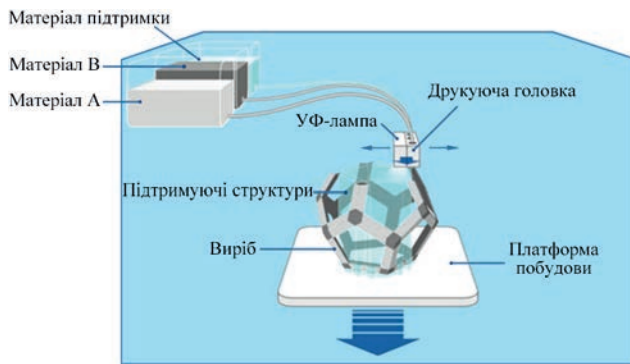


Рис. 3. Схема процесу PJet 3D-друку [20]

– матеріал А і матеріал підтримки – матеріал В (рис. 3) у відповідності до комп'ютерної CAD 3D-моделі. Кожен шар полімеризується світлом ультрафіолетової лампи відразу ж після нанесення. Шари наносяться один на одного до створення заданої об'ємної моделі. У підсумку виходить повнокольоровий тривимірний об'єкт, який можна використовувати відразу ж після завершення процесу друку, не вдаючись до додаткової обробки поверхні. Матеріал підтримуючих структур для навісних елементів майбутньої моделі, що використовується в процесі друку, після завершення друку легко видаляється механічно або змивається водою чи розчиняється в спеціальному розчині (для PolyJet 3D-друку) або виплавляються в спеціальній печі (для MJM 3D-друку).

Основні переваги багатоструменевого 3D-друку (PJet та MJM) 3D: висока точність (0,016...0,085 мм) і швидкість побудови моделей зі складною геометрією, відмінні фізичні і механічні властивості виробів; легке видалення підтримок, відсутність контакту з рідким фотополімером і проста заміна головок; можливість обробки поверхні (склеювання, шліфування, фарбування, ґрунтовка, нанесення різних покриттів і т. п.); можливість друку різними матеріалами при виготовленні однієї 3D-моделі в процесі єдиного робочого циклу; можливість застосування в офісному приміщенні; висока швидкість виготовлення масштабних проектів.

Основні недоліки технології: висока собівартість 3D-друку.

### SLS 3D-друк.

Вибіркове лазерне спікання – це одна з методик 3D-друку, яка широко застосовується на дорогих професійних 3D-принтерах і відрізняється високою якістю виробів [21]. З її допомогою можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів методом лиття під тиском. Ця методика дозволяє створювати повністю готові вироби складної геометричної форми за лічені години, що і пояснює її популярність серед промислових організацій усього світу.

Процес друку за технологією SLS полягає в пошаровому спіканні частинок порошкоподібного

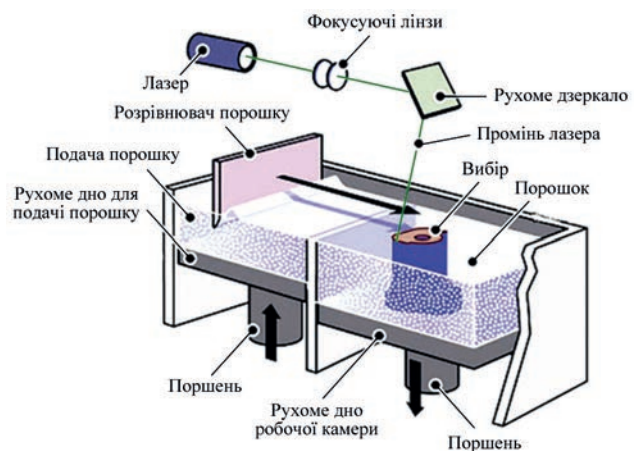


Рис. 4. Схема процесу SLS 3D-друку [22]

матеріалу до утворення фізичного об'єкта за заданою CAD-моделі. Спікання матеріалу відбувається під впливом променя одного або декількох лазерів (рис. 4).

Перед початком процесу побудови спеціальна секція 3D-принтера заповнюється витратним матеріалом, після чого запускається процес 3D-друку. Цікаво, що безпосередньо перед відтворенням витратний матеріал розігрівається майже до температури плавлення, що полегшує і прискорює роботу SLS-установки.

За допомогою лазерної установки і скануючого дзеркала промінь лазера направляється на необхідні ділянки порошку, спікаючи їх разом. Після спікання першого шару спеціальний механізм додає тонкий шар порошку поверх нього, і процес відбувається заново до повної побудови виробу. В процесі друку платформа робочої камери постійно опускається вниз (крок дорівнює товщині друкованого шару). Таким чином, зона взаємодії матеріалу і променя лазера завжди знаходиться на одному рівні, а відтворення об'єкта відбувається знизу-вгору.

SLS-процес не потребує побудови спеціальних підтримуючих структур. Як підтримуючі структури для побудови моделі складної геометрії тут виступає невикористаний порошок, який після вилучення готового виробу очищається і може знову використовуватися для друку.

Основні переваги технології SLS 3D-друку: можливість створення складних моделей високої міцності і якості (практично без видимої пошарової структури на моделях); відсутність необхідності в побудові підтримок; висока швидкість і продуктивність друку: SLS-принтери не потребують повного розплавлення частинок матеріалу, що дозволяє їм працювати набагато швидше за інші порошкові 3D-принтери; процес практично є безвідходним – невикористаний матеріал (до 90 % порошку) може повторно використовуватися для друку.

Основні недоліки технології: складність, громіздкість і висока вартість обладнання; можливе

забруднення при виробництві: порошок летючий і при необережному поводженні піднімається в повітря, засмічуючи навколишній простір і потрапляючи в легені людини; вимагає попереднього тривалого підігріву порошку, а також часу для охолодження готової моделі перед видаленням залишків порошку; складність обробки виробу після друку (відпал) в спеціальній печі для остаточного спікання порошку; усадка деталі після відпалу досягає часом значень 30 % (а в середньому 8...10 %) від початкового об'єму.

**SHS 3D-друк.**

Вибіркове теплове спікання – це технологія 3D-друку, яка подібна до вибіркового лазерного спікання. Єдина істотна відмінність полягає в використанні замість лазера для плавки шарів термопластичного порошку джерела інфрачервоного випромінювання [19, 23].

Процес SHS 3D-друку відбувається наступним чином: на пластину з кварцового скла (маску) спеціальним матеріалом, що відбиває інфрачервоне випромінювання, наноситься візерунок, який відповідає інвертованому перетину поточного шару об'єкта. Далі на робочу платформу подається необхідна кількість витратного матеріалу для побудови одного шару. Спеціальним роликem порошок розрівнюється, а його надлишки видаляються. Кварцова пластина знаходиться при цьому між областю побудови і джерелом випромінювання. Як тільки все готово, починається спікання першого шару. Оскільки випромінювання проходить через пластину, то ті її частини, які відбивають випромінювання, не залишають сліду на робочій платформі. Решта ділянок порошку спікається між собою. По завершенню створення першого шару робоча платформа опускається вниз на рівень одного шару, наноситься наступна порція порошку, старий візерунок з кварцовою пластини віддаляється і наноситься новий. Таким чином відбувається побудова всієї моделі. Після закінчення 3D-друку виріб виймається з 3D-принтера, видаляється з платформи і очищається від зайвого матеріалу. При необхідності проводиться подальша обробка.

Основні переваги технології SHS 3D-друку: висока швидкість друку; вартість SHS 3D-принтера і собівартість 3D-друку на ньому в рази менше, у порівнянні з SLS 3D-принтерами; відсутність необхідності в побудові підтримок; матеріал, який залишається після друку, може бути використаний повторно, що здешевлює процес; можливість створення виробів зі складною геометрією.

Основні недоліки технології: низька енергетична віддача, через що вибір витратних матеріалів в даній технології набагато менше; необхідність додаткового відпалу отриманих виробів для досягнення більшої міцності; менша міцність готових

виробів порівняно з виробами, які виготовлені за іншими промисловими технологіями.

**CJP 3D-друк.**

Кольоровий струменевий 3D-друк дозволяє швидко створювати як монохромні, так і кольорові об'єкти з композитного порошку [23]. Як витратний матеріал використовуються два види матеріалу – основний і зв'язуючий. Основний матеріал – порошковий пластик слугує для формування шарів виробу, в той час як зв'язуючий у вигляді клеєподібної субстанції одночасно склеює між собою частинки матеріалу в потрібних місцях у відповідності до комп'ютерної 3D-моделі і забарвлює в заздалегідь заданий колір. Спочатку полімерний порошок рівномірно тонким шаром розподіляється по всій площині платформи робочої камери 3D-принтера (рис. 5), надалі на нього наноситься зв'язуюча речовина і платформа зміщується вниз на товщину шару (в діапазоні від 0,089 до 0,102 мм). Далі процес повторюється і в результаті подальших циклів пошарово формується готовий виріб.

Порошок, який в процесі друку не використовується для формування моделі (не склеюється), виступає в ролі підтримуючої структури, що дозволяє створювати об'єкти зі складною геометрією. По закінченню циклу 3D-друку цей же залишковий порошок може бути зібраний і використаний повторно. Після завершення формування виробу на його поверхні залишається полімерний порошок, для видалення якого в 3D-принтері передбачена камера очищення, яка працює за допомогою стиснутого повітря. Надалі сформований виріб просочують цианакрилатом, більш відомим як «суперклей» для збільшення міцності і довговічності, а також досягнення більш яскравих кольорів.

Основні переваги технології SHS 3D-друку: низька собівартість виготовлення прототипу за рахунок низької вартості матеріалу і його безвідходного використання; висока швидкість 3D-друку і якість моделей; доступна кольорова палітра досягає 390000 відтінків; точність побудови поверхонь з різними ступенями складності від 0,4 до 0,1 мм; товщина стінок – від 0,5 мм, шарів – в діапазоні

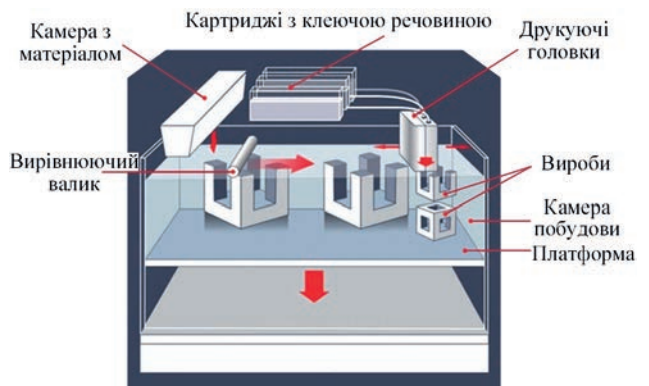


Рис. 5. Схема процесу CJP 3D-друку [24]



від 0,089 до 0,102 мм; прототипи легко шліфуються, склеюються і фарбуються; відсутність підтримуючих структур.

Основні недоліки технології: моделі мають гігроскопічну поверхню підвищеної шорсткості; виробу потребують обережної обробки після формування внаслідок їх крихкості.

### LOM 3D-друк.

Виготовлення тривимірних об'єктів методом ламінування полягає в пошаровому склеюванні матеріалів в заданих координатах (з комп'ютерної 3D-моделі) з подальшим обрізанням надлишків [23, 25]. Витратним матеріалом зазвичай слугує полівінілхлоридна (ПВХ) плівка товщиною 0,15 мм п'яти кольорів: напівпрозора (бурштинова), червона, синя, кремова, чорна. Формування виробу відбувається на спеціальній підкладці рухомої (вгору-вниз) платформи, на яку подається витратний матеріал з рулону або окремим листом, розподіляється під певним тиском і розігрівається до потрібної температури валиком (рис. 6). Після цього відбувається вирізання контуру першого шару моделі за допомогою лазера. Далі платформа опускається вниз на висоту одного шару, рулон повертається (або накладається новий лист) і поверх першого шару накладається наступний шар матеріалу, на нижню частину якого зазвичай нанесена сполучна речовина. За рахунок нагрівання і укладання під тиском відбувається склеювання (ламінування) шарів. Процес вирізання шарів і нанесення нових листів матеріалу повторюється до повного формування кінцевого виробу.

По завершенні процесу 3D-друку деталь виймають з 3D-принтера і очищують від обрізків. Надалі, за необхідності, проводять додаткову механічну обробку: шліфування, нанесення лаку, фарбування.

Основні переваги технології LOM 3D-друку: можливість повнокольорового друку з високою роздільною здатністю по осях X і Y; доступність і дешевизна витратних матеріалів; для моделей з

нависаючими або горизонтально виступаючими елементами не потрібно формування підтримуючих структур.

Основні недоліки технології: вкрай обмежений вибір матеріалів для створення моделей; недостатньо висока міцність виробів в площині шарів – існує ризик розшарування; підвищена шорсткість поверхні; товщина шару цілком залежить від товщини використовуваного листового матеріалу, через що модель формується грубою, а механічна обробка для згладжування доступна не завжди, оскільки може призвести до розшарування; велика кількість витратних матеріалів (обрізки) йде у відходи; виробництво з підвищеною пожежонебезпекою і виділенням диму.

### Висновок

В даний час всі перераховані вище технології отримали розвиток і мають величезний потенціал в зниженні витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. Однак на сьогодні не існує універсальної технології 3D-друку виробів з пластмас, яка вирішувала б всі завдання найкращим чином. Вибір тієї чи іншої технології ґрунтується на задачах, які мають бути вирішені: необхідної точності одержуваного виробу, міцності матеріалу і його довговічності, більш точної передачі зовнішнього вигляду майбутнього виробу та інше. При цьому важлива собівартість і швидкість виготовлення тривимірного об'єкту, яка теж залежить від обраної технології 3D-друку. У будь-якому випадку, зроблений вибір в сторону адитивних технологій замість традиційних методів виробництва, приводить до економії коштів, економії часу, спрощення виробничого процесу створення деталей, його безпеки та ін. Перспективи на сьогодні такі, що в найближчому майбутньому, на думку аналітиків, тривимірний друк буде використовуватися у всіх галузях діяльності людини [27]. Тому не дивно, що темпи розвитку адитивних технологій стрімко збільшуються з кожним роком і вже сьогодні в динаміці розвитку ринок адитивних технологій випереджає інші галузі виробництва.

### Список літератури/References

1. Diyachenko, V.A., Chelpanov, I.B., Nikiforov, S.O., Hozonhonova, D.D. (2015) *Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping)*. Ulan-Ude, Izd-vo BNC SO RAN, Russia [in Russian].
2. Ligon, S.C., Liska, R., Stampfl, J. et al. (2017) Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chem. Rev.*, **117**, 10212–10290.
3. David, L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub, David W. Rosenc (2009) *A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead*. RapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009, Istanbul.
4. Hull, CW. (1986) Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *U.S. Patent 4575330A*.
5. Michael Feygin (1986) Apparatus and method for forming an integral object from laminations, *U.S., Patent No 872102*.

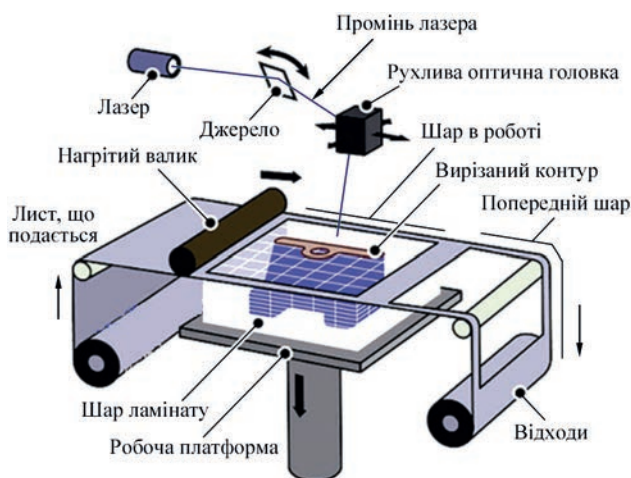


Рис. 6. Схема процесу LOM 3D-друку [26]

6. Deckard, CR. (1989) Method and apparatus for producing parts by selective sintering. *U.S. Patent 4863538A*.
7. Crump, SS. (1992) Apparatus and method for creating three-dimensional objects. *U.S. Patent 5121329A*.
8. James, F. Bredt, Nam P. Suh, Francis, A. Waldman (1995) Three-dimensional printing techniques. *U.S. Patent 5387380*.
9. Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I. et al. (2016) 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices. *Adv. Mater.*, **28**, 4449–4454.
10. Salmi, M., Paloheimo, K-S, Tuomi, J. et al. (2013) Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *J. of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **41**(7), 603–609.
11. <https://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/sfery-primenenija-3D-pechati>
12. Turner, BN, Strong, R., Gold, SA. (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping J.*, **0**(3), 192–204.
13. [http://3dtoday.ru/wiki/3dprint\\_basics/](http://3dtoday.ru/wiki/3dprint_basics/)
14. Kazemi, M., Rahimi, A. (2015) Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts. *Rapid Prototyping*, **21**, 79–88.
15. Jacobs, PF. (1992) *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, New York, U.S.
16. Zhang, X., Jiang, X., Sun, C. (1999) Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures. *Sensor Actuat A-Phys.*, **77**–149.
17. <http://3dprofy.ru/stereolitografiya-sla/>
18. Gibson, I., Rosen, DW, Stucker, B. (2010) *Additive manufacturing technologies*. NY: Springer, New York, U.S.
19. Kazmer, D. (2017) Three-dimensional printing of plastics. In: *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*. William Andrew Publishing, Amsterdam, *The Netherlands*, 617–634.
20. [http://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/polyjet/](http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/polyjet/)
21. Peyre, P., Rouchausse, Y., Defauchy, D., Régnier, G. (2015) Experimental and numerical analysis of the selective lasersintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers. *J. Mater. Process. Technol.*, **225**, 326–336.
22. <https://3dprinter.ua/additivnye-tehnologii-chto-jeto/>
23. Zlenko, M.A., Nagajcev, M.V., Dovbysh, M.V. (2015) *Additive technologies in mechanical engineering: Manual for engineers*. Moscow, GNC RF FGUP «NAMI», Russia [in Russian].
24. <http://blog.iqb-tech.ru/cjp-technology>
25. Antonova, V.S., Osovskaja, I.I. (2017) *Additive technologies: A Tutorial*. St-Petersburg, VShTJe SPbGUPTD Russia [in Russian].
26. <https://3d-expo.ru/ru/article/izgotovlenie-obek-tov-metodom-laminirovaniya-lom-78841>
27. Androshhuk, G.O. (2017) Additive technologies: perspectives and problems of 3D printing. *Nauka, tehnologii, innovaci*, **1**, 68–77.

## ADDITIVE TECHNOLOGIES OF POLYMERIC MATERIALS (Review)

O.P. Masyuchok, M.V. Yurzenko, R.V. Kolisnyk, M.G. Korab

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper gives the analysis of the state of the art of 3D technologies of polymeric materials, which is based on publications presented both in open sources as well as in a wide range of scientific and technical journals, including the own experience of the authors in 3D printing using thermoplastic and thermosetting polymers. The history of additive technologies, state of the art and trends of the development of the market of three-dimensional printing are considered. The classification of the most widespread in the world technologies of additive manufacturing of products from polymeric materials depending on the methods of processing plastics is offered, their short description is given, their features, advantages and disadvantages are presented. 27 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

*Key words: additive technologies, 3D-printing, polymeric materials*

Надійшла до редакції 04.05.2020



### MSV 2020 – 62-а Міжнародна машинобудівна виставка

Чехія, м. Брно,  
5-9 жовтня 2020

Міжнародна виставка машинобудування MSV проводиться в м. Брно щорічно. Веде свою історію з 1958 р. Визнана однією з провідних європейських машинобудівних виставок і найважливішою подією для всього промислового комплексу країн Східної та Центральної Європи і проводиться за підтримки Союзу промисловості та транспорту ЧР, чеського Союзу виробників і постачальників машинобудівної техніки, Чесько-Моравської електротехнічної Асоціації, а також уряду Чеської республіки.

Щорічно в MSV бере участь понад 1600 експонентів і понад 80000 відвідувачів, з яких 47 % зарубіжних. Серед відвідувачів виставки високий відсоток фахівців галузі: 70 % приймають рішення про інвестиції, третя частина відвідувачів – вищий менеджмент. Як і в попередні роки на MSV плануються колективні експозиції таких країн, як Німеччина, Італія, Швейцарія, Франція.

MSV представить всі ключові напрямки машинобудівної та електротехнічної галузей. Спеціальною тематикою майбутніх виставок стане «INDUSTRY 4.0» – автоматизація та інтеграція промислових секторів, як новий етап розвитку промислового виробництва. В черговий раз буде зроблений акцент на темі «Трансфер технологій та іннова-

цій», що дозволить широко презентувати науково-дослідні розробки для промислового використання, тісний зв'язок вищих навчальних закладів з виробництвом.

Велика супровідна програма як завжди буде невід'ємною частиною MSV. Програма організовується на найвищому міжнародному рівні і запрошує учасників на численні форуми, конференції, семінари. В рамках MSV традиційно пройде Салон ділових можливостей «Контакт-Контракт» B2B Fair, Бізнес-дні країн СНД.

У жовтні 2020 р. виставка MSV буде проводитися спільно з рядом технологічних виставок:



Міжнародна виставка металообробки та формування



Міжнародна виставка ливарної промисловості



Міжнародна виставка зварювальної техніки



Міжнародна виставка технологій для обробки поверхонь



Міжнародна виставка пластмас, гуми та композитів