

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Ганєєв Т.Р., Прибисько І.О., Руденко М.М., Петренко І.О.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Чернігів – 2023

УДК 681.6-023.5

A30

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 7 від 29.05.2023 р.)

Рецензенти:

В. Вовк, кандидат технічних наук, доцент;

Л.В. Петрушинець, кандидат технічних наук;

Л.С. Котельчук, кандидат технічних наук, доцент.

Аддитивні технології : навч. посіб. / Т. Р. Ганєєв, І. О. Прибителько, А30 М. М. Руденко, І. О. Петренко – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 105 с.

ISBN 978-617-7932-48-1

У посібнику міститься інформація про сучасні технології аддитивного виробництва, матеріали, обладнання та орієнтовні режими друку. Описано найбільш поширені технології, проаналізовано області використання. Посібник призначений для інженерного складу, аспірантів, здобувачів вищих навчальних закладів. Може використовуватися при вивченні навчальних дисциплін «Аддитивні технології», «Інноваційні технології в галузі», «Інноваційні інженерно-будівельні технології», «Прототипування історичних будівель та споруд» та «Сучасні системи візуалізації».

УДК 681.6-023.5

ISBN 978-617-7932-48-1

© Ганєєв Т. Р., Прибителько І. О.,
Руденко М. М., Петренко І. О., 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 Класифікація матеріалів за ефективністю використання.....	7
РОЗДІЛ 2 Класифікація матеріалів за технологією.....	9
2.1 Матеріали для FDM/GFG друку.....	9
2.1.1 PLA пластик.....	9
2.1.2 ABS пластик.....	12
2.1.3 ASA пластик.....	14
2.1.4 PP пластик.....	16
2.1.5 PMMA пластик.....	18
2.1.6 HIPS пластик.....	20
2.1.7 PC пластик.....	22
2.1.8 PA пластик.....	24
2.1.9 PET, PETG пластик.....	25
2.1.10 TPE, TPU, TPC пластик.....	27
2.1.11 PEI пластик.....	29
2.1.12 PEEK пластик.....	32
2.2 Матеріали для SLA та DLP друку.....	34
2.3 Матеріали для DMLS та SLS друку.....	37
2.4 Матеріали для LSM друку.....	39
РОЗДІЛ 3 Технології адитивного виробництва.....	41
3.1 Струменеве нанесення в'язучого (BJ).....	41
3.2 Пряме підведення енергії та матеріалу (DED).....	43
3.3 Екструзія матеріалів (ME).....	48
3.4 Струменеве нанесення матеріалу (MJ).....	51
3.5 Синтез на підкладці (PBF).....	53
3.6 Листова ламінація (SL).....	58
3.7 Фотополімеризація у ванні (VP).....	59
РОЗДІЛ 4 Дизайн та моделювання.....	63
4.1 Програмне забезпечення для моделювання та дизайну.....	63
4.1.1 Autodesk Fusion 360.....	63
4.1.2 SolidWorks.....	65
4.1.3 Blender.....	67
4.1.4 SketchUp.....	69
4.2 Розробка та оптимізація дизайну для адитивного виробництва.....	71

4.3	Програмне забезпечення для підготовки деталі до друку.....	72
4.3.1	Ultimaker Cura.....	74
4.3.2	Simplify3D.....	75
4.3.3	PrusaSlicer.....	76
4.3.4	FlashPrint.....	76
4.3.5	ideaMaker.....	77
4.3.6	ChiTuBox.....	78
4.3.7	Lychee Slicer.....	78
РОЗДІЛ 5	Виробництво та застосування.....	80
5.1	Виробництво деталей з використанням адитивних технологій.....	80
5.2	Застосування адитивних технологій у промисловості.....	80
5.3	Застосування адитивних технологій у медицині.....	82
5.4	Застосування адитивних технологій у науці та освіті.....	83
5.5	Тенденції та майбутнє адитивного виробництва.....	85
	ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	87
	ДОДАТОК А. Аналітичні дані.....	97

Вступ

Адитивні технології – це процеси створення тривимірних об'єктів пошаровим додавання матеріалу на основі цифрових моделей. Вони також відомі як 3D-друк.

Сфера застосування адитивних технологій дуже широка від автомобільної та аерокосмічної промисловості до медицини, архітектури та мистецтва.

Одна з найцікавіших особливостей адитивних технологій полягає в тому, що за їх допомогою можливо створювати надскладні геометричні форми, які було б дуже складно або неможливо виготовити традиційними методами виробництва. Це забезпечує більш високу точність та ефективність виробництва, а також допомогу інноваційному розвитку в різних галузях.

Історія адитивних технологій починається в 1980-х роках з розробки пристроїв, які дозволяли створювати тривимірні моделі об'єктів. Перші з цих пристроїв були досить примітивні і використовувалися для прототипування інженерних деталей та моделей.

Згодом, з появою нових матеріалів та технологій, адитивні технології стали все більш популярними та розширеними. У 1990-х роках з'являються пристрої, які використовувалися для створення об'ємних фігур, наприклад, для створення художніх творів або для створення прототипів.

У 2000-х роках адитивні технології значно розвинулися. Було розроблено нові матеріали, такі як полімери, кераміка та метали, які дозволяють створити більш складні та точні об'єкти. З'являються нові технології, які дозволяють друкувати з високою швидкістю та точністю.

Сьогодні адитивні технології знаходять застосування в різних галузях, таких як медицина, авіаційна та автомобільна промисловість, будівництво, виробництво меблів та багато інших. Вони можуть створювати складні об'єкти з високою точністю та швидкістю, що значно полегшує виробничий процес та дозволяє отримати якіснішу продукцію.

У 1984 році Чак Халл розробив першу машину для стереолітографії (SLA), який став співзасновником корпорації 3D Systems. SLA — це процес, у якому лазер використовується для затвердіння фотополімерної смоли шар за шаром для створення 3D-об'єкта. Це був перший випадок 3D-друку, який здійснив революцію у промисловості.

Протягом 1980-х і 1990-х років було розроблено багато інших форм 3D-друку, включаючи моделювання наплавлення (FDM), вибіркоче лазерне спікання (SLS) і виготовлення об'єктів ламінуванням (LOM). Ці технології дозволили створювати більш складні об'єкти та допомогли розширити застосування 3D-друку.

На початку 2000-х 3D-друк став більш доступним для широкої громадськості завдяки розробці більш доступних настільних принтерів. Це призвело до сплеску інтересу до 3D-друку серед любителів, художників і майстрів.

Сьогодні 3D-друк продовжує розвиватися та розширюватися. Технологія використовується в різних галузях, від аерокосмічної та автомобільної до охорони здоров'я та моди. Це також створило умови для зародження нових форм виробництва.

Оскільки технологія 3D-друку продовжує розвиватися, цілком ймовірно, що вона стане ще доступнішою, створюючи ще більше інновацій та можливостей у промисловості.

Незважаючи на те, що адитивне виробництво з'явилося відносно недавно, воно вже впроваджено до цілого спектру галузей і сфер і продовжує швидко розвиватися та розширювати свої можливості.

Незалежно від того, чи ви студент, дослідник чи професіонал галузі, розуміння історії та поточного стану адитивного виробництва має важливе значення для того, щоб залишатися в курсі подій і бути поінформованим про цю галузь, що швидко розвивається. Вивчаючи розробки, виклики та інновації, які сформували розвиток адитивного виробництва, ми можемо глибше оцінити можливості та потенціал цієї потужної технології.

РОЗДІЛ 1. Класифікація матеріалів за ефективністю використання

Спектр матеріалів, що використовуються в адитивному виробництві, враховуючи всі існуючі технології, достатньо складно класифікувати. Матеріали можуть використовуватися у вигляді ниток, плівок, гранул, порошоків, або рідин. Матеріалами можуть бути полімери, метали, віск, кварцовий пісок, шоколад та інше. Крім того це не завжди однокомпонентні матеріали. Тому застосовують різноманітні підходи до класифікації матеріалів, єдиною спільною рисою всіх підходів є поділ матеріалів за приналежністю до певної технології. Як приклади різноманіття підходів розглянемо класифікацію полімерних матеріалів, що ґрунтується на їх поділі за ефективністю використання та класифікацію за технологією.

Класифікація за ефективністю використання (табл. 1) є досить суб'єктивною і підтримується не всіма дослідниками, але є якісним елементом маркетингу на рівні виробників.

Таблиця 1– Класифікація полімерних матеріалів за ефективністю використання

Товарні або звичайні пластмаси (Commodity or Common Plastics)	Інженерні пластмаси (Engineering Plastics)	Високоякісний пластик (High-Performance Plastics)
PLA	PC	PEI
ABS	PA (nylon)	PEEK
ASA	PET	PEKK
PP	TPU	PVDF
PMMA	TPE	PPSU
HIPS	TPC	
	PETG	

Під поняттям ефективність використання розуміють забезпечення умовного рівня за одним чи декількома параметрами, такими як міцність, хімічна стійкість, термічна стійкість, оптична прозорість, електричний опір. Однак деяка умовність вимог для входження матеріалу до певної групи обмежує використання даного підходу.

Не зважаючи на вказаний недолік класифікація полімерних матеріалів за ефективністю використання надає можливість спростити сприйняття (рис. 1.1) та систематизувати масив інформації про полімери, що застосовуються в адитивному виробництві.

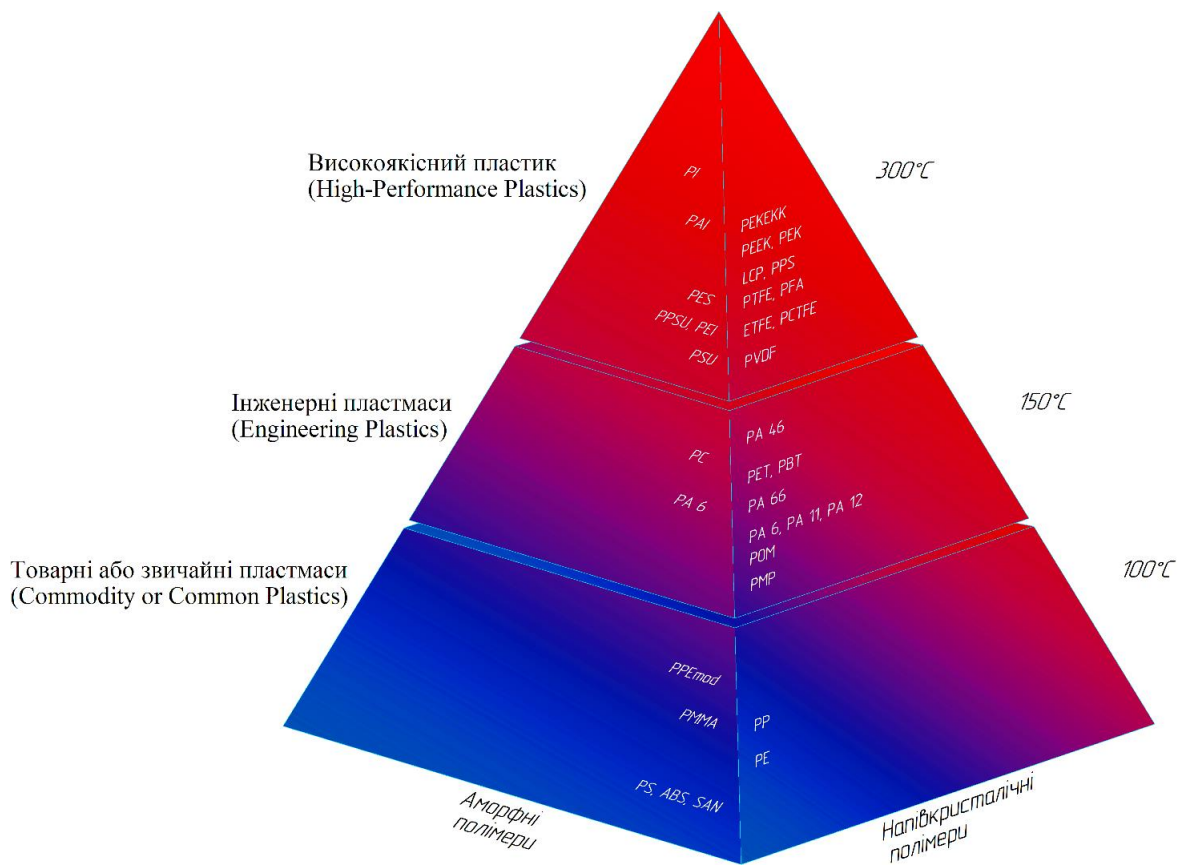


Рисунок 1.1 – Варіант класифікації за ефективністю використання

Товарні та інженерні пластмаси на даний час займають переважну частину вітчизняного ринку матеріалів для адитивного виробництва. Однак не зважаючи на ціну та технічні складності друку вискоефективні пластики починають витісняти товарні пластики та формувати ринок промислових матеріалів. Вискоефективний пластик найчастіше використовується для

функціональних деталей кінцевого використання. Вони також використовуються як функціональні прототипи для деталей, які згодом будуть виготовлені з металу, скла, або деталей, які будуть масово вироблятися, наприклад, прототипи автомобільних деталей. Ціновані сьогодні як заміна дорогих і екологічно нестійких металів, таких як мідь, латунь, титан і алюміній, високоефективні полімери стійкі до окислення, корозії та хімічного забруднення. Вони також інакше реагують на тепло, ніж метали, що є перевагою в різних застосуваннях від медичних імплантатів до двигунів.

РОЗДІЛ 2. Класифікація матеріалів за технологією

2.1 Матеріали для FDM/GFG друку

2.1.1 PLA пластик

PLA (англ. Polylactic acid, інші назви ПЛА-пластик, Полілактидна кислота, Полілактид) — біорозкладний термопластичний полієфір, що одержують переробкою молочної кислоти. Являє собою біоактивний термопласт, отриманий з відновлюваних ресурсів, таких як кукурудзяний крохмаль, корінь маніюки, гранул крохмалю та цукрової тростини.

PLA пластик з молочної кислоти синтезують двома способами: шляхом конденсації молочної кислоти в лактид з подальшою полімеризацією, або шляхом використання процесу конденсації безпосередньо з молочної кислоти. Перший метод більш поширений і передбачає зв'язування молекул разом шляхом додавання різних каталізаторів під час нагрівання.

PLA як матеріал для 3D-друку має низку очевидних переваг, особливо для початківців:

- легкість друку: PLA надзвичайно легко друкувати; майже всі 3D-принтери можуть друкувати цим матеріалом. PLA вимагає відносно низьких температур порівняно з іншими матеріалами, може друкуватися досить швидко (близько 60 мм/с) і не потребує наявності закритого корпусу принтера;

- вартість: вартість PLA досить низька у порівнянні з іншими, більш спеціалізованими матеріалами для друку, такими як нейлон або полікарбонат (ПК), що робить його чудовим варіантом для виробників із обмеженим бюджетом;
- широкий вибір кольорів: PLA випускається практично в будь-якому кольорі (рис. 2.1);



Рисунок 2.1– Кольорова гама PLA пластику від українського виробника Plexiwire

- екологічний: PLA отримують з відновлюваних ресурсів рослинного походження. Крім того, дослідження показали, що процес виробництва PLA споживає на 65% менше енергії та виробляє значно менше парникових газів, ніж виробництво інших пластиків;
- нетоксичний: PLA є нетоксичним, що розширює його застосування в таких сферах, як медична та харчова промисловість;
- відсутність шкідливих випарів: незважаючи на те, що PLA може виділяти деякі випари, запаху майже немає.

Недоліки PLA пластику:

- крихкість і відносно низька міцність: найбільш очевидним недоліком PLA є його низька міцність на згин. Деталі надруковані з PLA мають значно меншу міцність, ніж деталі, виготовлені литтям під тиском, і навіть меншу за деталі, надруковані з інших матеріалів;
- стійкість до охолодження та нагрівання: PLA не є термостійким. PLA має низьку температуру склування, тому деталі, надруковані з цього матеріалу, мають тенденцію деформуватися в умовах високої температури, що робить PLA менш ідеальним матеріалом для зовнішнього використання;
- стійкість до ультрафіолету: PLA погано справляється з сонячними променями. Подібно до нагрівання, деталі PLA можуть деформуватися під дією ультрафіолетового світла протягом тривалого періоду часу;
- хімічна стійкість: PLA не розчиняється в таких розчинниках, як ацетон або ізопропіловий спирт, і в цілому PLA пластик є хімічно стійким і стабільним матеріалом. Однак легко розчиняється в діхлорметані;
- час біорозкладання: PLA є біологічно розкладаним, але навіть в ідеальному середовищі пластикові деталі з PLA розкладаються не менше ніж за три місяці.

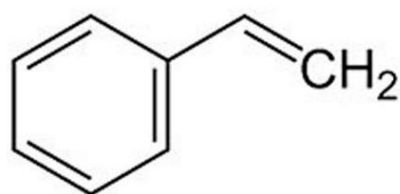
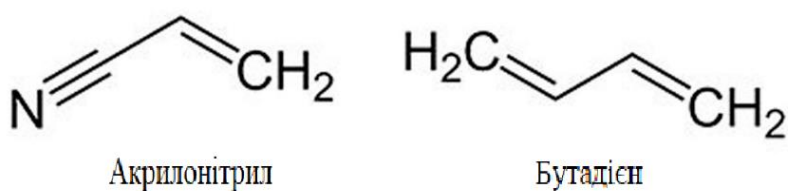


2.1.2 ABS пластик

ABS пластик (Акрилонітрилбутадієнстирол) — термопластичний конструкційний матеріал. Температура склування становить близько 105°C. Матеріал має підвищену ударостійкість і пружність. ABS є одним із найбільш використовуваних пластиків. Вперше він з'явився у 1940-х роках і спочатку продавався як альтернатива бакеліту.

ABS складається з трьох мономерів (структурна формула 2.1). Хімічна стійкість забезпечується наявністю акрилонітрилу. Бутадієн відповідає за довговічність, міцність та ударостійкість, тоді як стирол надає жорсткість. Пропорції можуть залежати від марки та виробника від 15 до 35% акрилонітрилу, від 5 до 30% бутадієну і від 40 до 60% стиролу.

Акрилонітрилбутадієнстирол легко піддається, як механічній, так і хімічній обробці, легко склеюється розчинниками, при цьому утворює, фактично, монолітну структуру.



Стирол

(2.1)

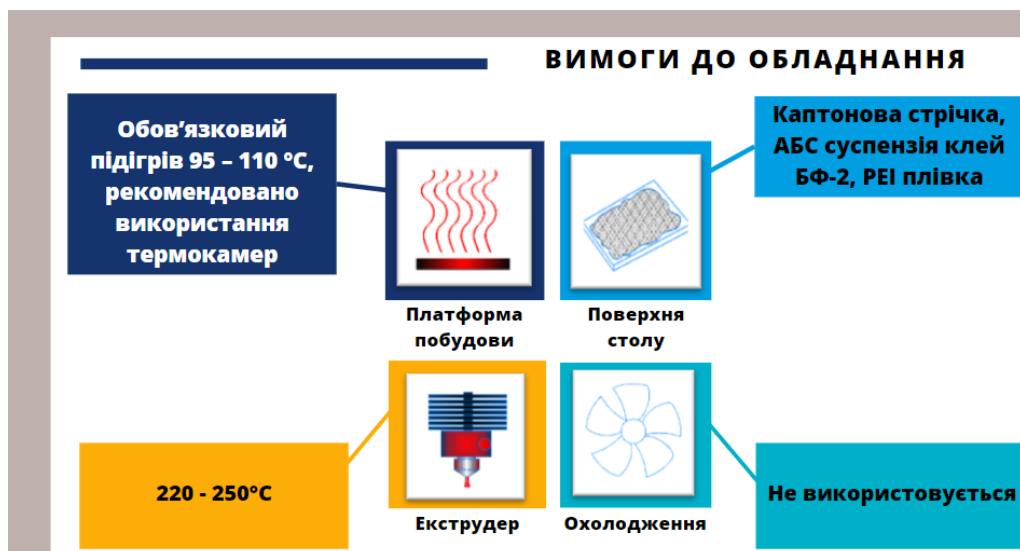
Сьогодні він є незамінним в серійному виробництві автозапчастин, корпусів приладів та побутових речей. Перевагами ABS є:

- хороші механічні властивості: матеріал має значну міцність і довговічність. ABS відносно гнучкий і тому менш крихкий, ніж PLA;
- легко піддається подальшій обробці: ABS набагато легше шліфувати, ніж PLA. Його також можна обробити парами

ацетону , що повністю видаляє всі нерівності та забезпечує чисту гладку поверхню.

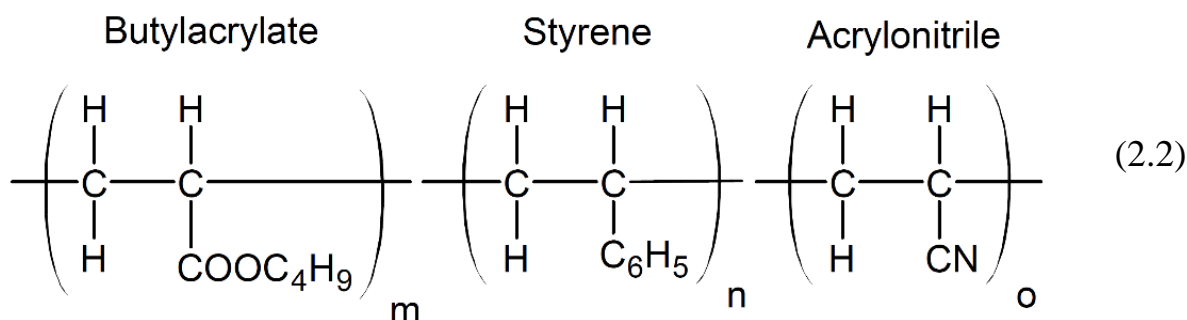
Недоліки ABS:

- токсичні пари: під час друку ABS виділяються токсичні випари стиролу . Цю проблему можна вирішити, друкуючи в добре провітрюваному приміщенні;
- технологічні складнощі: ABS вимагає належного регулювання температури, оскільки він повинен охолоджуватися повільно, щоб уникнути виникнення тріщин та розшарування. Значна деформація виробів також є проблемою, особливо для об'єктів із великою бічною поверхнею та 3D-принтерів без корпусу;
- чутливість до ультрафіолетового випромінювання: ABS чутливий до ультрафіолетового випромінювання, тому його може пошкодити пряме сонячне світло. З цієї причини не рекомендується друкувати зовнішні частини з ABS. PETG і ASA є хорошою альтернативою для таких застосувань.



2.1.3 ASA пластик

ASA пластик (Акрил-стирол-акрилонітрильний сополімер) є термопластичним еластомером (структурна формула 2.2). Цей тип сополімеру є стійким до ультрафіолетового випромінювання, тепла (до 94 ° C), вологи, розтріскування під навантаженням та, ймовірно, має найкращу стійкість до атмосферних впливів серед усіх акрилонітрильних еластомерів. Він також володіє хімічною стійкістю і значною ударною міцністю. Його механічні властивості дуже подібні до еластомерів акрилонітрил-бутадієн-стиролу (АБС). Однак, на відміну від каучуку на основі бутадієну, ASA не має подвійних зв'язків у полімерній основі, що призводить до значно покращеної стійкості до атмосферних впливів та ультрафіолетового випромінювання, а також до кращої тривалої теплової та хімічної стійкості порівняно з дієновими каучуками.



Одним із найважливіших ринків для ASA є автомобільні кузовні деталі, такі як корпуси дзеркал і решітки радіаторів. Термопласти ASA також широко використовуються в будівництві, виробництві побутової техніки, електротехніки та промисловості спортивних товарів.

Перевагами ASA є:

- стійкість до ультрафіолету: на відміну від ABS не набуває жовтого забарвлення під дією випромінювання та не руйнується;
- хімічна стійкість: є інертним до дії бензинів, дизельного пального та мастил;
- водостійкий;

- можливість постобробки ацетоном;
- висока ударостійкість;
- жорсткість;
- міцність;
- антистатичний матеріал.

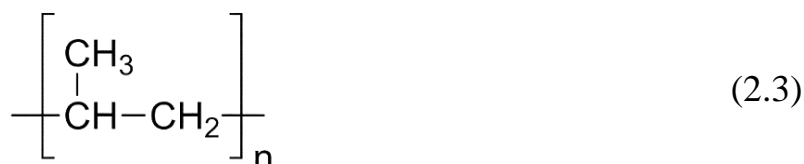
Недоліки ASA:

- токсичні пари: під час друку ASA виділяються токсичні випари стиролу;
- технологічні складнощі: ASA вимагає належного регулювання температури, щоб уникнути виникнення тріщин та розшарування, схильний до деформування в процесі охолодження;
- вартість матеріалу;
- висока температура екструзії;
- висока температура стола;
- потребує багато енергії для друку.



2.1.4 PP пластик

PP пластик (Поліпропілен, polypropylene) – синтетичний полімер, продукт полімеризації пропілену (структурна формула 2.3). Характеризується високою ударною міцністю, стійкістю до багаторазових згинань, зносостійкістю, низькою паро- й газопроникністю, високими діелектричними показниками.



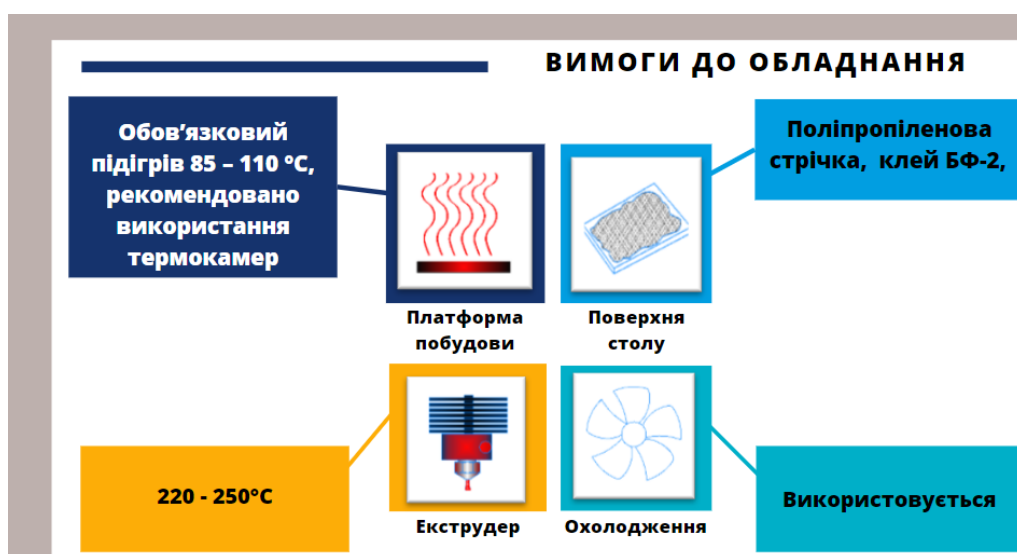
Поліпропілен став популярним вибором для виробників через його низьку вартість і багато сприятливих хімічних властивостей, найважливіші з яких:

- водостійкість: дуже водонепроникний, ця властивість має важливе значення для застосування в медичних і промислових виробках;
- міцність на розтяг та еластичність: незважаючи на відносно низьку щільність, матеріал здатний витримувати великі навантаження;
- коефіцієнт пропускання випромінювання: за відповідних обставин можна отримати високу пропускну здатність;
- варіативність кольорів: фарбування матеріалу без погіршення механічних властивостей пластику;
- висока температура розм'якшення: порівняно з іншими пластиками, характеристика робить його чудовим вибором для лабораторних і харчових приладів де потрібні високі температури;
- хімічна стійкість: щільно упаковані кристалічні структури напівкристалічних полімерів захищають їх від розчинення;
- біологічна стійкість: не пліснявіє і не псується під впливом біологічних факторів, таких як бактерії або грибки;
- електричний опір: полімер зазвичай використовується в електронних компонентах;

- нетоксичність: за даними Управління з контролю за якістю харчових продуктів і медикаментів, поліпропілен загалом вважається безпечним для контакту з їжею та людьми та не містить продукт конденсації фенолу — бісфенол А;
- можливість вторинної переробки: теоретично поліпропілен можна переробляти як хімічно, так і механічно.

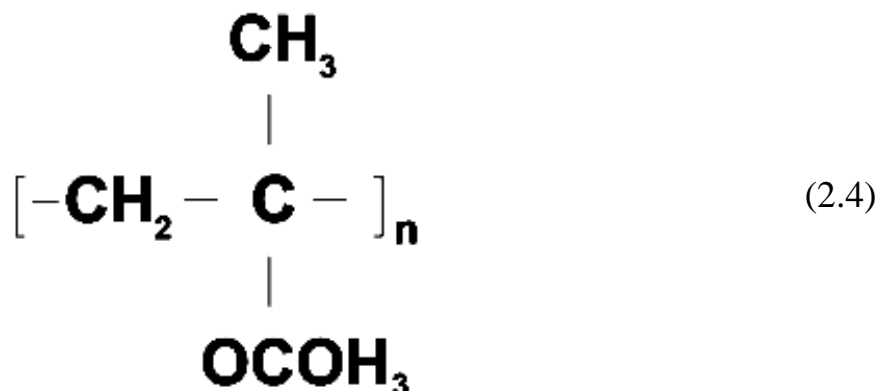
Недоліки РР:

- висока горючість: цей матеріал гарно підтримує горіння;
- УФ-деградація: полімер схильний до пошкодження сонячним світлом, що руйнує полімерні зв'язки.;
- технологічні складнощі: низька адгезія до робочого столу, значна деформація виробів;
- низька стійкість до хлорвмісних розчинників і ароматичних речовин;
- погані адгезивні властивості: це ускладнює фарбування та впливає на його сумісність з певними клеями;
- схильність до окислення: поліпропілен схильний до термоокислювальної деградації, яку можна певною мірою усунути, додавши до суміші антиоксиданти.



2.1.5 PMMA пластик

Поліметилметакрилат (ПММА, органічне скло, PMMA – Polymethyl methacrylate) – полімер метилметакрилату (структурна формула 2.4), твердий прозорий без кольору аморфний матеріал (рис. 2.2). PMMA може фарбуватися виробниками, але кількість кольорів дуже обмежена.



Не розчиняється у воді, спиртах, стійкий до дії розбавлених лугів, кислот, фізіологічно не шкідливий і стійкий до біологічних середовищ. Морозостійкий (-60 °C). Характеризується високою прозорістю. Володіє високою атмосферостійкістю, гарними фізико-механічними та електроізоляційними властивостями.



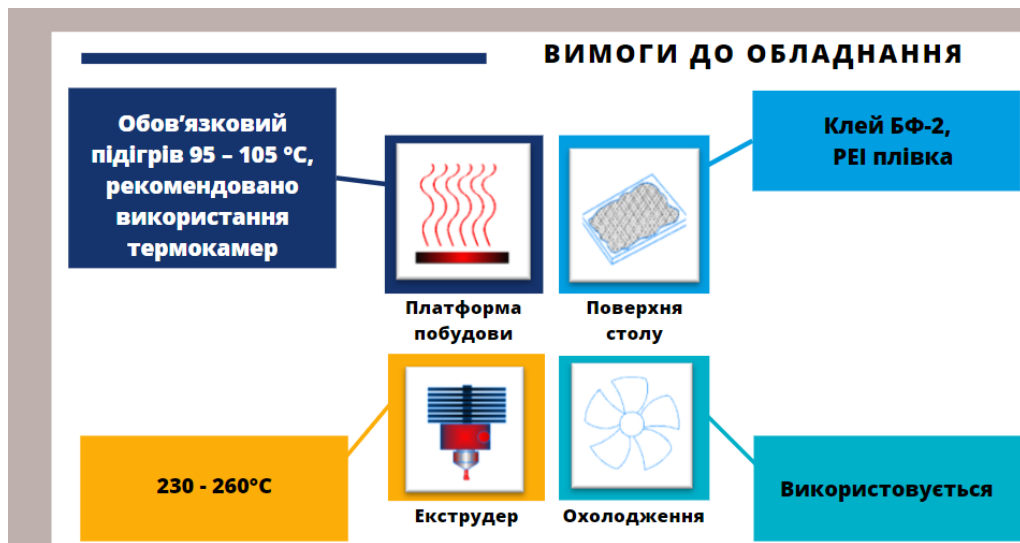
Рисунок 2.2– PMMA пластик від виробника KLEMA (Польща)

Перевагами поліметилметакрилату є:

- ударна в'язкість;
- коефіцієнт пропускання випромінювання;
- хімічна стійкість;
- біологічна стійкість.

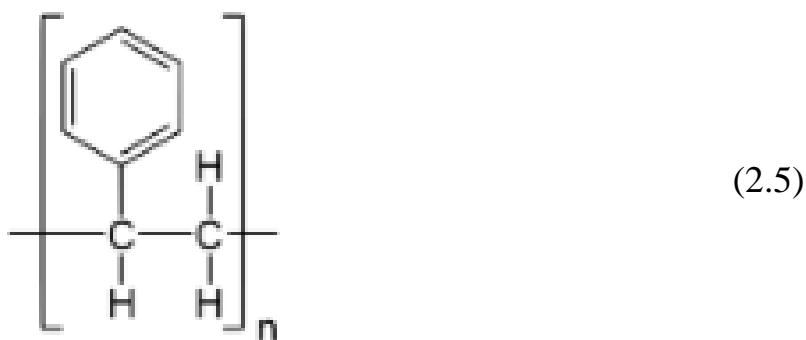
Недоліки РММА:

- низька адгезія до робочого столу, значна деформація виробів.



2.1.6 HIPS пластик

Ударостійкий полістирол (УПС, HIPS - High-impact Polystyrene) – аморфний матеріал, що являє собою сополімер стиролу з полібутадієном або іншими синтетичними каучуками, а, також, суміш сополімерів стиролу (структурна формула 2.5). Збільшення вмісту каучуку збільшує ударостійкість матеріалу, в цілому. Матеріал непрозорий, жорсткий, твердий, стійкий до ударних впливів, до охолодження і перепадів температур. Розчиняється в лімонені- натуральному розчиннику, що одержують з цитрусових, його можна використовувати для створення підтримуючих структур в 3D друці, які не доведеться видаляти механічно (рис. 2.3).



Основна перевага HIPS над ABS пластиком, це його гарні електроізоляційні властивості. HIPS має дуже схожі характеристики з ABS в плані ударної міцності й жорсткості. HIPS як і ABS дуже легко друкується без особливих налаштувань принтера. Надруковані моделі з HIPS можна шліфувати, ґрунтувати, а також вони можуть бути пофарбовані в будь-який колір. Однак, не дивлячись на деяку схожість з властивостями ABS, HIPS все ж значно відрізняється від нього. Наприклад, дуже важливою перевагою HIPS є його повне розчинення в лімонені, який має сильний запах цитрусів. Однак, лімонен не взаємодіє з ABS. Розчинність в лімонені дуже цікава властивість, що робить HIPS матеріалом, який використовують в якості матеріалу підтримки для друку складних структур.

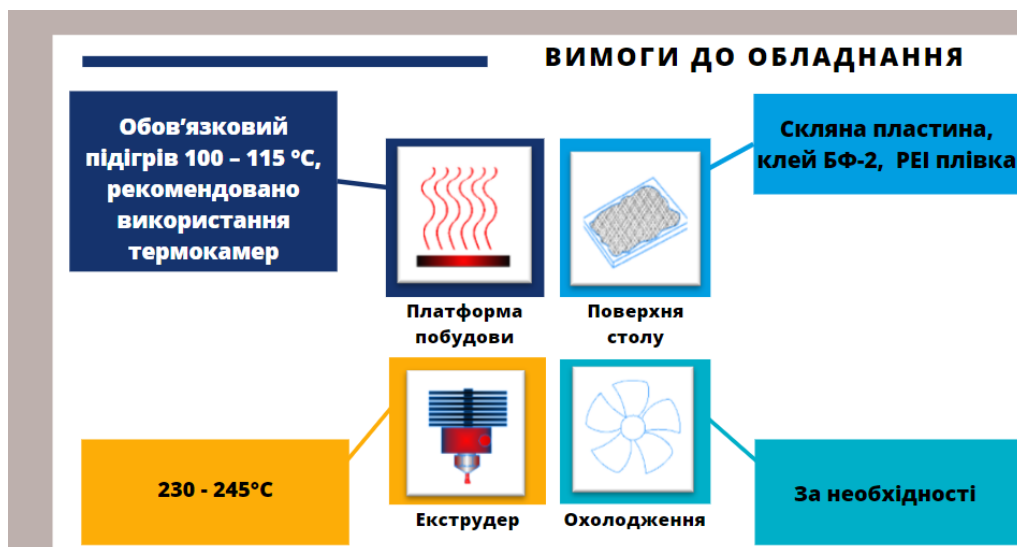


Рисунок 2.3– Розчинення підтримок з HIPS пластика від Simplify3D
 HIPS став популярним через наступні властивості:

- низька вартість;
- ударостійкий і водостійкий;
- розчинний d-лімоненом.

Недоліки HIPS:

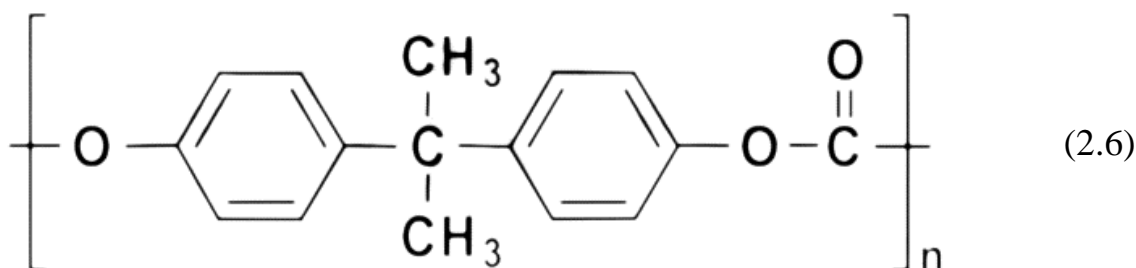
- висока температура друку;
- необхідна вентиляція.



2.1.7 PC пластик

Полікарбонат (PC) – це високоміцний матеріал, призначений для важких середовищ і інженерних застосувань (структурна формула 2.6). Має надзвичайно високу тепловіддачу та ударну в'язкість. Полікарбонат також має високу температуру склування 150°C. Це означає, що він зберігатиме свою структурну цілісність до цієї температури, що робить його придатним для використання в умовах високої температури. Більшість доступних полікарбонатних ниток містять добавки, які дозволяють друкувати нитку за нижчих температур.

Полікарбонат надзвичайно гігроскопічний, тобто він поглинає вологу з повітря, що вплине на якість друку та міцність. Після відкриття його слід зберігати в герметичних контейнерах без вологи. Він також потребує дуже високих температур для друку та демонструватиме низьку адгезію шарів, якщо друкувати за дуже низької температури або ввімкненому охолодженні. Полікарбонат часто найкраще друкувати на обладнанні, яка має закритий робочий об'єм і здатна витримувати високі температури столу та екструдера.



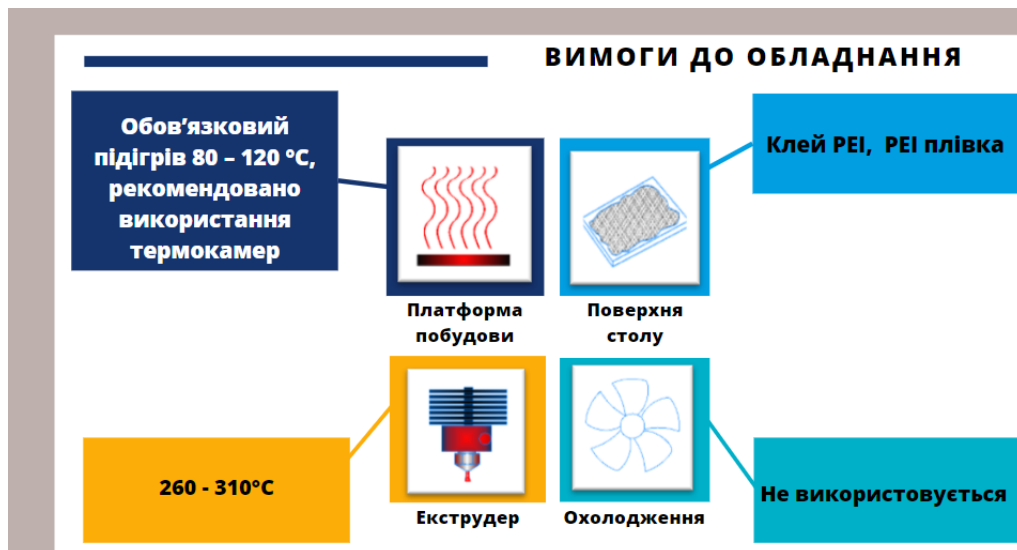
Перевагами PC є:

- ударостійкий;
- висока термостійкість: зберігає структурну цілісність до температури склування;
- прозорий;
- згинається без руйнування: при малих кутах згину зменшує прозорість в зоні деформування без руйнування.

Недоліки PC:

- вимагає дуже високих температур друку;

- схильний до деформування;
- висока в'язкість при температурах друку;
- поглинає вологу з повітря, що може спричинити дефекти друку: пари води в процесі друку утворюють бульбашки в об'ємі розплаву, що значно зменшує оптичну прозорість.



2.1.8 PA пластик

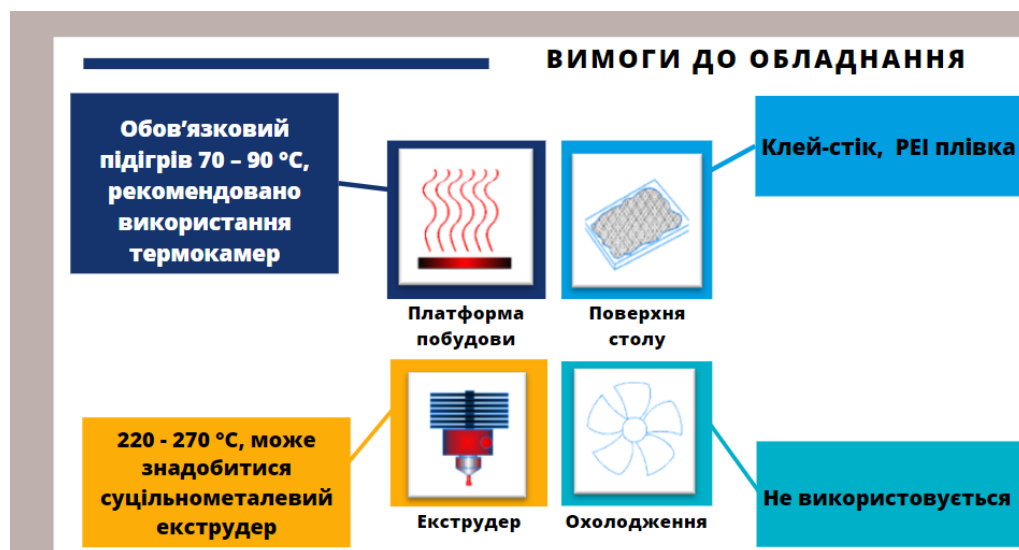
Поліаміди (ПА, РА, нейлон) як клас пластмас – доступні в РА6, РА11, РА12 та інших варіантах хімічного складу. Як правило, виготовлені на нафтовій основі (за винятком РА11, який є біопластиком). До загальних рис філаментів на основі поліаміду відносяться хімічна інертність і антифрикційні властивості. ПА зазвичай армують вуглецевими, скляними та кевларовими волокнами або вбудовують безперервне вуглецеве волокно для додаткового зміцнення. Широко використовується для виготовлення високоякісних інженерних елементів, таких як шестерні, струбцини, пристосування та інструменти, РА доступний у вигляді нитки та порошку.

Перевагами РА є:

- міцність і жорсткість при високій температурі;
- ударна міцність навіть при низькій температурі;
- стійкість до стирання та зносу;
- стійкість до палива та мастила;
- електроізоляційні властивості;
- стійкість до розтріскування та старіння.

Недоліки РА:

- висока водопоглинаюча здатність;
- не стійкий до дії мінеральних кислот і розчинників.



2.1.9 PET, PETG пластик

Поліетилентерефталат (ПЕТФ, ПЕТ, англ. PET, також поліестер, дакрон, майлар, лавсан) – термопласт, найпоширеніший представник класу поліестерів, відомий під різними фірмовими назвами. Тверда, безбарвна, прозора речовина в аморфному стані і біла, непрозора в кристалічному стані. Міцний, зносостійкий, гарний діелектрик. Стійкий проти дії більшості органічних розчинників, але руйнується в лужних та аміачних розчинах, розчиняється у фенолах і хлорофенолах. Стійкий проти дії мікроорганізмів, тому його природний розклад надзвичайно повільний.

PETG – модифікована гліколем версія поліетилентерефталату (PET), яка зазвичай використовується для виробництва пляшок для води. Це напівтвердий матеріал з хорошою ударостійкістю, але має дещо м'якшу поверхню, що робить його схильним до зношування. Матеріал також має чудові теплові характеристики, що дозволяє пластику ефективно охолоджуватися з майже незначним викривленням. На ринку є кілька варіантів цього матеріалу, включаючи PETG, PETE та PETT.

PET, PETG належать до однієї групи поліетилентерефталатів. PET є одним із найбільш використовуваних у світі пластиків, особливо для упаковки харчових продуктів і напоїв. PETG, з іншого боку, широко використовується для 3D-друку через його високу хімічну та термостійкість, гарну довговічність. Ймовірно, PETG не є полімером інженерного класу через його низьку міцність, зносостійкість і ударостійкість PETG робить його придатним для ряду промислових застосувань, де економічний пластик є пріоритетом.

Переваги PET, PETG:

- значна хімічна і термостійкість;
- довговічність;
- помірна жорсткість і міцність;
- безпечний для харчових продуктів і нетоксичний;
- напівпрозорий і має глянцеvu поверхню.

Недоліки PET, PETG:

- провисання шарів в місцях відсутності опирання;
- складність забезпечення режимів друку без неконтрольованої екструзії полімеру (рис.2.4).



Рисунок 2.4– Приклад невідповідності налаштувань друку і рекомендацій виробника



2.1.10 TPE, TPU, TPC пластик

Термоеластопласт (англ. Thermoelastoplastic, TPE) – термопластичний еластомер, що є лінійним або зірчастим блоккополімером, складеним з жорстких блоків термопластів і гнучких блоків еластомерів (вінілароматичних або дієнових вуглеводнів або уретанових каучуків) і поєднують властивості обох.

TPE – це клас матеріалів, які є сумішшю пластику та гуми, і включають TPU (термопластичний поліуретан), TPC (термопластичний співполіестер) та інші. Ці пластики дуже м'які і гнучкі.

Вони стають все більш поширеними в адитивному виробництві для виготовлення деталей, які можна згинати або розтягувати без руйнування (рис. 2.5). Твердість TPU за Шором 90A – 40D, а видовження при розриві складає 510%. Температура експлуатації виробів: $-40 +140^{\circ}\text{C}$. TPU також, як правило, більш довговічні та можуть забезпечувати вищу стійкість до стирання, масел, хімікатів, а також високих і низьких температур, ніж нитка TPE. TPC володіє стійкістю до високих температур і чудовою стійкістю до ультрафіолету. Він особливо цінується в біомедичних розробках, а також для носіння та медичних пристроїв.



Рисунок 2.5– Ілюстрація гнучкості TPU від tractus3d.com

Переваги TPE, TPU, TPC:

- висока еластичність у всьому діапазоні твердості;
- низькотемпературна і ударна міцність;
- стійкість до мастил і розчинників;
- радіаційна стійкість;
- електроізоляційні властивості;
- може виготовлятися в різних ступенях твердості.

Недоліки TPE, TPU, TPC:

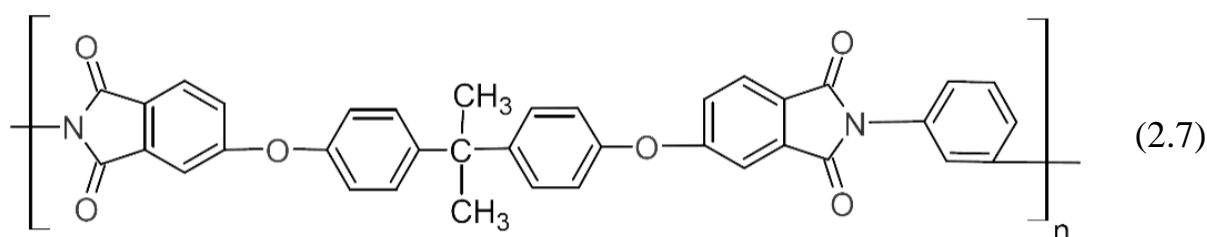
- провисання шарів в місцях відсутності спірання;
- складність забезпечення режимів друку без неконтрольованої екструзії полімеру.



2.1.11 PEI пластик

Поліетеріміди (Polyetherimides, PEI) – високоефективні інженерні термопластики. Їх отримують конденсаційною полімеризацією ароматичного ефіру діаміну і ароматичного діангідриду, або реакцією нітрозаміщення за участю бісфенолу А, 4,4-метилендіаніліну та 3-нітрофталевого ангідриду (структурна формула 2.7).

Ароматична кільцева структура вздовж полімерної основи покращує термічні, механічні та хімічні властивості, тоді як введення гнучких ароматичних ефірних зв'язків покращує технологічність та ударну в'язкість.



PEI полімери доступні в досить обмеженій кількості кольорів, однак окрім неармованих, виготовляють наповнені вуглецем або скловолокном (рис. 2.6).

PEI мають видатні термічні, механічні та хімічні властивості і часто є гарним вибором для відповідальних конструкцій, де потрібна дуже висока механічна міцність у поєднанні з високою температурною, корозійною стійкістю та зносостійкістю. PEI стійкі до більшості хімічних речовин, включаючи вуглеводні, спирти та розчинники на основі хлору, і мають відмінну довготривалу міцність на зріз. У багатьох конструкціях вони можуть замінити метали та інші високоякісні матеріали. Застосування включає деталі в електротехнічній промисловості, а також аерокосмічні та автомобільні деталі.

Поліетерімід (PEI) вперше був розроблений у 1982 році компанією General Electric (автор Джозеф Г. Вірт) під торговою назвою Ultem, як він і досі широко відомий. Цей високоякісний пластик характеризується чудовими тепловими, механічними та електричними властивостями. PEI забезпечує

високе співвідношення міцності до ваги, що робить його економічно ефективною альтернативою металу. PEI достатньо міцний, щоб замінити сталь у деяких сферах застосування, і досить легкий, щоб використовувати його в інших для заміни алюмінію, зокрема в аерокосмічній галузі.



Рисунок 2.6 – Зразок друку поліетерімідом від 3dnatives.com

Інші сфери застосування PEI включають в себе компоненти редукторів, корпуси клапанів, корпуси датчиків і термостатів, медичні вироби. Існує багато сортів Ultem, найпоширенішим з яких є Ultem 1000. Ultem 1010 — це аморфний матеріал, а Ultem 2300 — 30% склоармований матеріал.

Перевагами PEI є:

- добре зберігає механічні властивості при надзвичайно високих температурах;
- значна питома міцність, жорсткість, гнучкість;
- електричні властивості;
- стійкість до ультрафіолетового випромінювання та погодних умов;
- вогнестійкість;

- стійкий до спиртів, кислот і вуглеводневих розчинників, але частково розчиняється в розчинниках на основі хлору;
- PEI також демонструє хорошу гідролітичну стабільність, особливо добре працює в умовах гарячого повітря та води;
- більшість класів PEI відповідають стандартам для контакту з їжею.

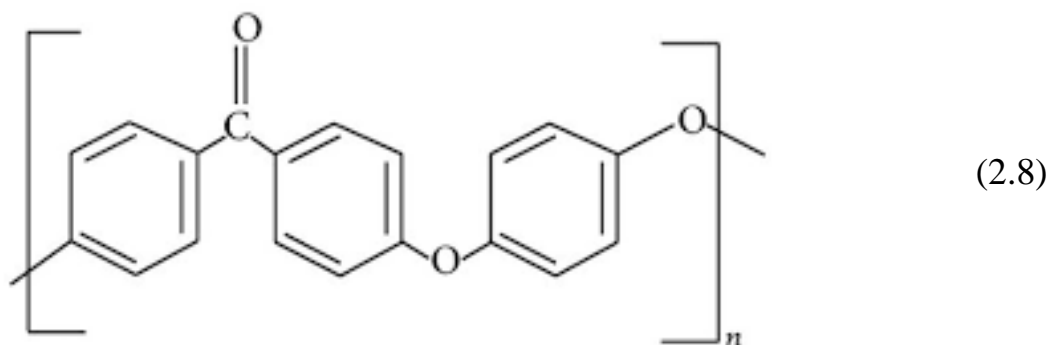
Недоліки:

- висока вартість.



2.1.12 PEEK пластик

PEEK (ПЕЕК) належить до сімейства полімерів поліарилетеркетону (структурна формула 2.8) і користується зростаючою популярністю для застосування у військовій, фармацевтичній, нафтохімічній промисловості та упаковці харчових продуктів.

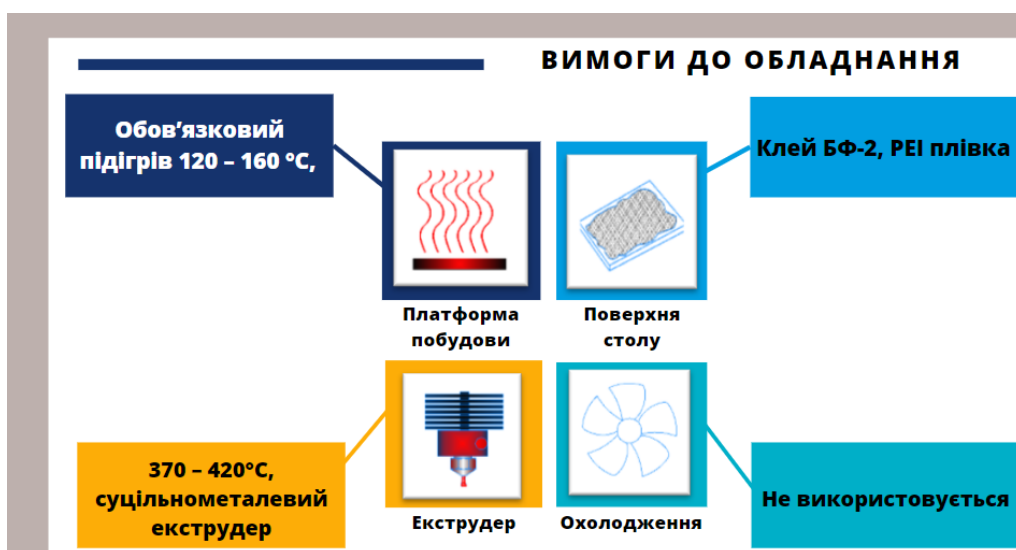


Однак його висока вартість і складна обробка обмежують його промислове використання з окремими принтерами. PEEK має менш ніж половину ваги алюмінію та одну шосту сталі, що робить його чудовою заміною металевих частин у нафтовій і газовій промисловості та в аерокосмічній галузі. Властивості PEEK можна додатково покращити, поєднавши його з композитними матеріалами, такими як скловолокно, графіт або вуглецеві армуючі елементи, які допомагають боротися з усадкою. PEEK також використовується для медичних імплантатів (оскільки він повністю біосумісний і прозорий для рентгенівського випромінювання) PEEK є високоміцною альтернативою фторполімеру завдяки більш високим показникам стійкості до зношування та стирання.

Переваги:

- високі температури використання (до 260 °C довгостроково та до 310 °C на короткий період);
- відмінна хімічна та гідролізна стійкість;
- відмінні зносостійкість й фрикційні властивості;
- добрі електроізоляційні та діелектричні властивості;
- відмінні механічні властивості за високих температур;

- висока механічна міцність, жорсткість і твердість, також і за високих температур;
- дуже хороша розмірна стійкість;
- низька займистість і рівень утворення диму під час горіння;
- відмінна стійкість до активного випромінювання (гамма і рентген);
- стійкість до розтріскування.



2.2. Матеріали для SLA та DLP друку

На відміну від пластику у FDM 3D принтерах, у пристроях, що працюють за технологіями SLA та DLP застосовуються спеціальні *фотополімерні смоли*.

Фотополімерна смола – це рідкий реактопласт, який змінює свої фізичні і хімічні властивості під впливом УФ-випромінювання, з довжиною хвилі 365-405 nm.

Фотополімерні смоли (рис. 2.7) для 3D принтера можуть бути різних типів і призначені для роботи з різними технологіями друку. Деякі з них:

- поліестероксидні смоли (PES): характеризуються високою твердістю та стійкістю до високих температур. Часто використовуються для друку деталей з високою точністю;
- поліпропіленові смоли (PP): характеризуються низькою твердістю та гарною гнучкістю. Використовуються для друку гнучких деталей;
- поліацетальдегідні смоли (PAD): мають хорошу стійкість до впливу зовнішніх факторів, але не можуть використовуватися при високих температурах. Використовуються для друку деталей із середньою точністю;
- поліфталімідні смоли (PFL);
- полігідроксипропіленові смоли (PHD): характеризуються середньою твердістю та хорошою стійкістю до впливу зовнішніх факторів. Використовуються для друку деталей із середньою точністю;
- полікарбонатні смоли (PC): характеризуються високою твердістю та хорошою стійкістю до високих температур. Використовуються для друку деталей з високою точністю;

- поліфенолаетерні смоли (PFA): характеризуються високою твердістю та стійкістю до високих температур. Використовуються для друку деталей з високою точністю.



Рисунок 2.7 – Колорова гама фотополімерних смол від Анусубіс (КНДР) та Monofilament (Україна)

Вибір типу фотополімерної смоли для 3D-принтера залежить від призначення та умов використання виробу.

На сьогоднішній день існують фотополімерні смоли з різними фізичними та механічними властивостями, пристосовані під випалювання, виготовлення ливарних форм, виготовлення високо деталізованих та гнучких деталей.

Прикладом фотополімерної смоли для випалювання є полімерна смола zWAX від 3NTR (Італія) з додаванням воску, вона дає повне вигорання без зольних залишків, при виробництві виплавлених ливарних форм, що дозволяє досягати високої деталізації вироблених матриць. Іншим прикладом є фотополімерна смола CASTABLE RESIN від виробника SIRAYA TECH (США) (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Фотополімерна смола від виробника SIRAYA TECH (США) та приклади виробів

Режим випалювання фотополімеру у різних виробників дещо відрізняється, орієнтиром може слугувати температура 950°C та час випалювання від 30 хвилин.

Відмінністю фотополімерів для виготовлення ливарних форм є відсутність вимоги, що до зольного залишку, через використання технології роз'ємних форм.

2.3. Матеріали для DMLS та SLS друку

Для DMLS, SLS та подібних технологій друку використовують декілька десятків видів металевої сировини у форматі сферичних гранул розмірами від 4 до 80 мікрон. Найбільш популярні металеві порошки для 3D-друку бувають як на основі кольорових металів (алюмінієвих, титанових, мідних, кобальт-хромових), так і із сплавів заліза.

Сталеві порошки можна розділити на:

- нержавіючі;
- інструментальні;
- нікелеві.

За допомогою таких порошоків створюються вироби складної форми, а їхня густина перевищує показники лиття. Вироби, надрукована на 3D-принтерах, застосовується в харчовій, аерокосмічній, нафтогазовій промисловості, а також в медицині, протезуванні, машинобудуванні, електроніці, ювелірної справі.

Розглянемо порошки від національного виробника компанії ТОВ «Аддитивні лазерні технології України». Перспективний алюмінієвий сплав AlSi10Mg поставляється у вигляді сферичних гранул порошку з номінальним розміром частинок від 20 до 63 мкм.

Сфера застосування: аерокосмічна, авіабудування, автомобілебудування та енергетика.

Готові вироби мають гарні механічні характеристики та незначний рівень анізотропії (табл. 2.1), що перш за все пов'язано з сформованою структурою металу (рис. 2.9).

Шорсткість поверхні готового виробу подібна до шорсткості литого виробу.

Інший представник – біосумісний титановий сплав Ti6Al4V. Готові вироби з даного матеріалу мають високу стійкість до корозії, підвищену міцність і низьку питому вагу. Постається у вигляді сферичного порошку з номінальним розміром частинок від 15 до 53 мкм.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні властивості виробів з сплаву $AlSi10Mg$

	Горизонтальний напрямок ХУ	Вертикальний напрямок Z
Межа міцності, МПа	325-350	330-360
Межа плинності, МПа	210-245	175-225
Модуль Юнга, ГПа	67-77	62-72
Подовження, %	9-14	5-12
Твердість, НВW	114-124	
Густина, г/см ³	2,66	

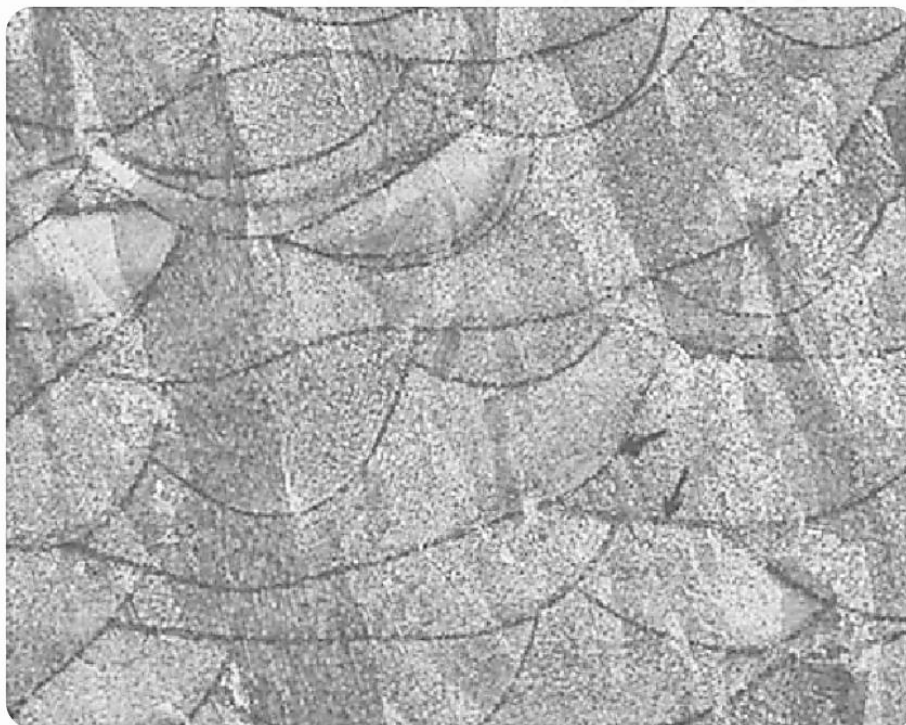


Рисунок 2.9 – Мікрошліф виробу з сплаву $AlSi10Mg$

Готові вироби практично не змінюють механічні характеристики по напрямках (табл. 2.2).

Таблиця 2.2– Фізико-механічні властивості виробів з сплаву $Ti6Al4V$

	Горизонтальний напрямок ХУ	Вертикальний напрямок Z
Межа міцності, МПа	1130-1250	1100-1250
Межа плинності, МПа	1050-1150	1000-1125
Модуль Юнга, ГПа	105-115	110-115
Подовження, %	5-10	5-10
Твердість, НВ0.5	385-405	395-405
Густина, г/см ³	4.42	

Сфера застосування: аерокосмічна, авіабудування, автомобілебудування та медицина.

Третій представник лінійки порошків для 3D друку жароміцний хромо-нікелевий сплав Inconel 718, здатний до дисперсійного зміцнення. Сплав демонструє відмінну тривалу міцність при температурах до 700 °С. Поставляється у вигляді порошку з номінальним розміром частинок від 15 до 45 мкм.

Готові вироби мають дещо менші показники міцності (табл. 2.3).

Таблиця 2.3– Фізико-механічні властивості виробів з сплаву Inconel 718

	Горизонтальний напрямок ХУ	Вертикальний напрямок Z
Межа міцності, МПа	998-1100	804-1030
Межа плинності, МПа	709-830	568-684
Модуль Юнга, ГПа	108-178	114-134
Подовження, %	22-32	5-10
Твердість, HBW	319-344	
Густина, г/см ³	8,19	

Сфера застосування: аерокосмічна, автомобілебудування, авіабудування, енергетика, нафтогазова та хімічна промисловість.

2.4. Матеріали для LCM друку

Керамічні матеріали в адитивному виробництві достатньо новий матеріал. Цікавим розробником керамічних матеріалів є фірма Lithoz (Австрія) (рис. 2.10). Підсумовуючи наявні дані виробника відмітимо наступні сполуки, як основи хімічного складу керамічних матеріалів:

- нітрид кремнію;
- нітрид алюмінію;
- оксид кремнію;
- оксид алюмінію;
- цирконій;

- трикальційфосфат;
- гідроксиапатит.



Рисунок 2.10 – Медичний виріб виготовлений з кераміки LithaNit 782 на основі бета-SiAlON

Матеріали з оксиду алюмінію використовують при виготовленні високоефективних ізоляторів для електротехнічної промисловості, направляючих в текстильній техніці, захисних елементів в термічних процесах. Нітридні, цирконієві, трикальційфосфатні та гідроксиапатитові кераміки застосовують як біологічно сумісний матеріал в медицині.

Питання для самоконтроля

- 1. Як класифікують полімерні матеріали для 3d друку?***
- 2. Які діаметри філаменту використовують для FDM друку?***
- 3. Які полімери відносять до високопродуктивних?***
- 4. Для яких матеріалів не застосовують охолодження повітрям?***
- 5. Чи використовують для SLA друку гранульований полімер?***
- 6. В чому полягає відмінність між фотополімерною смолою для випалювання та виготовлення ливарних форм?***
- 7. Чи використовуються композитні матеріали для 3d друку?***
- 8. Яким матеріалом поступово замінюють ABS пластик?***
- 9. Якими розчинниками проводять хімічну постобробку виробів з ABS полімеру?***
- 10. Якими розчинниками проводять хімічну постобробку виробів з TPU полімеру?***
- 11. Які полімери мають величину водопоглинання більшу за 1,5%?***

РОЗДІЛ 3. Технології адитивного виробництва

Найбільш розповсюдженими видами технологій адитивного виробництва (АВ) є:

- струменеве нанесення в'язучого/ Binder Jetting (BJ);
- пряме підведення енергії та матеріалу/ Directed Energy Deposition (DED);
- екструзія матеріалів/ Material Extrusion (ME);
- струменеве нанесення матеріалу/Material Jetting (MJ);
- синтез на підкладці/ Powder Bed Fusion (PBF);
- листова ламінація/ Sheet Lamination (SL);
- фотополімеризація у ванні/ Vat Photopolymerization (VP).

Провівши аналіз досліджень у напрямку впровадження виготовлених деталей за допомогою АВ у галузі машинобудування, розглянемо перспективи застосування кожного з видів.

3.1. Струменеве нанесення в'язучого (BJ)

Метод Binder Jetting (BJ) схожий на роботу звичайного офісного принтеру, але замість нанесення чорнила на папір, тривимірний принтер за технологією BJ наносить клей, так звану в'язучу речовину в порошок, таким чином формуючи модель. Висота шару при друці за даною технологією 50-200 мкм.

Принцип роботи принтеру за технологією BJ (рис. 3.1) можна розділити на такі стадії:

1. переміщення головки друку над платформою.
2. розподілення крапель в'язучої речовини по шару матеріалу.
3. переміщення платформи вниз на задану висоту шару.
4. нанесення нового шару порошку над попереднім.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

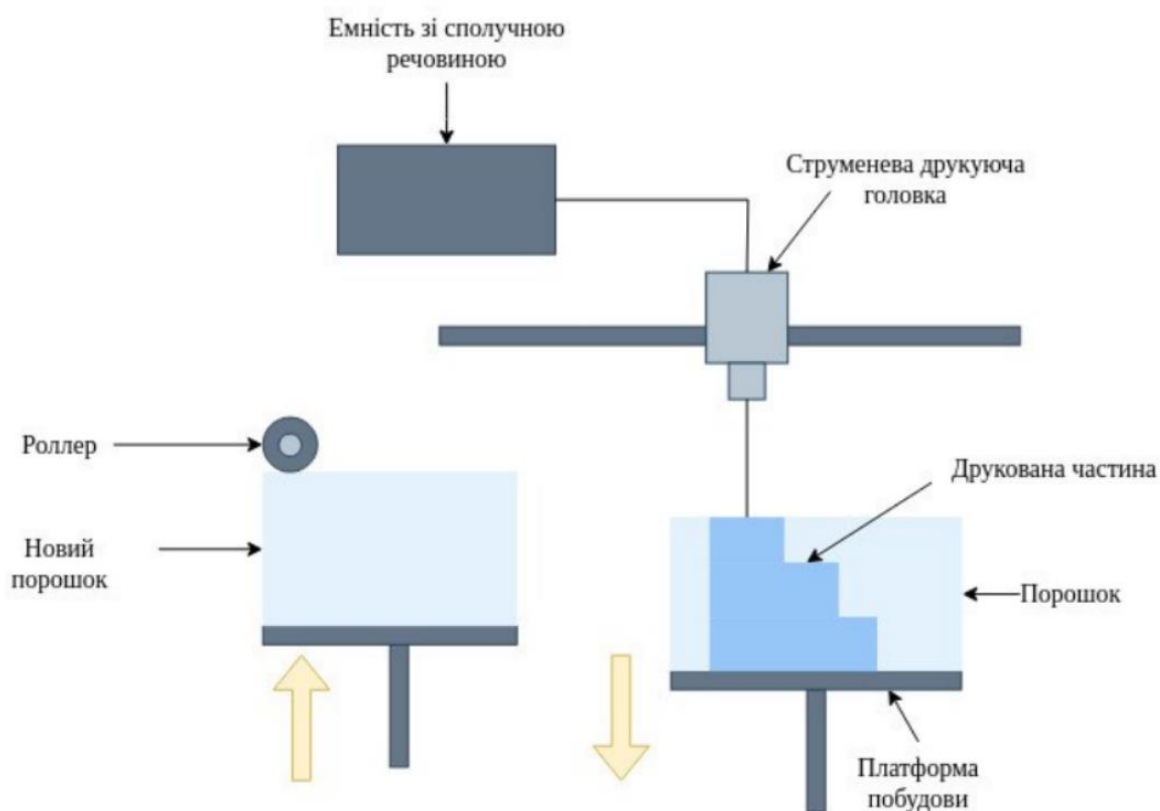


Рисунок 3.1 – Принцип роботи принтеру за технологією VJ

Серед інших технологій АВ, VJ відрізняється високою роздільною здатністю та можливістю друку однієї деталі різними матеріалами. У якості витратної сировини використовують: алюміній, бронзу, кераміку, гіпс, пісок, інконель та нержавіючу сталь. Технологія дозволяє створювати об'єкти швидше ніж більшість інших процесів АВ, в залежності від типу принтера 1100 - 3120 см³/год, у повній кольоровій гаммі за рахунок додавання барвнику до в'язучої речовини.

Найчастіше для покращення механічних властивостей деталі до в'язучої речовини додають ущільнювачі такі як цианокрілатний клей при використанні кераміки або бронзи. Друк на керамічній основі ідеально підходить для створення архітектурних моделей, форм для лиття у піщану форму, сувенірів або прикрас. Металеві деталі можуть бути використані у якості функціональних компонентів, вони мають нижчу вартість ніж ті що виготовлені за технологією SLM або DMSL але і їх механічні властивості гірше.

Широко досліджено виготовлення за допомогою ВІ провідних доріжок плат керування, досліджували виробництво, за допомогою ВІ, світловипромінюючих речовин та електрично активних пристроїв.

Вартість принтерів за технологією ВІ сягає від 5 тис. до 1.8 млн. доларів США.

3.2. Пряме підведення енергії та матеріалу (DED)

Другий вид технологій адитивного виробництва це Directed Energy Deposition (DED). Технологія має багато спільних рис з технологією де використовується екструзія полімерних матеріалів (FDM), але замість полімеру використовується метал.

Принцип роботи принтеру за технологією DED можна розділити на такі стадії:

1. Вихідний металевий матеріал у вигляді порошку або дроту безперервно подається через сопло де відбувається розплавлення матеріалу лазером, електронним променем або дугою. У місці осадження він охолоджується та твердіє.

2. Триосьова машина друкує форму поперечного перерізу відбитка вздовж осей X та Y, накладаючи перерізи один на одного вздовж осі Z для створення об'ємної деталі.

П'ятиосьові DED принтери не обмежені пошаровим нарощуванням деталі, оскільки вони можуть наносити матеріал під будь-яким кутом. Такі принтери можуть використовуватись навіть більше ніж просто машини для створення виробів з нуля, вони також застосовуються для ремонту інших існуючих металевих виробів, оскільки мають можливість наносити матеріал безпосередньо на них за рахунок чого відбувається відновлення вихідної геометрії, зробити нарощування, якого раніше не було. Технологію Directed Energy Deposition інколи називають Directed Metal Deposition, причиною являється те, що фактично це одне й те ж саме, адже DMD (Directed Metal Deposition) це технологія осадження металів.

З технології прямого підведення енергії та матеріалу можна виділити два основні типи технологій:

- Laser Engineered Net Shape (LENS Building) – плавлення шляхом створення форми лазером;
- Electron Beam Additive Manufacture (EBAM) – електронно-променеве адитивне виробництво.

В LENS Building використовується головка осадження, яка складається з лазерної головки, сопел для дозування порошку і трубок з інертним газом.

Принцип роботи принтеру за технологією LENS (рис. 3.2) можна розділити на такі стадії:

1. лазер проходить через центр головки створюючи басейн розплаву;
2. у місці побудови виробу з боків відбувається розпилення порошку де він розплавляється після чого твердне;
3. інертний газ утворює захисне середовище, яке не містить кисню і води, що запобігає окисленню поверхні і сприяє покращеній адгезії шарів.

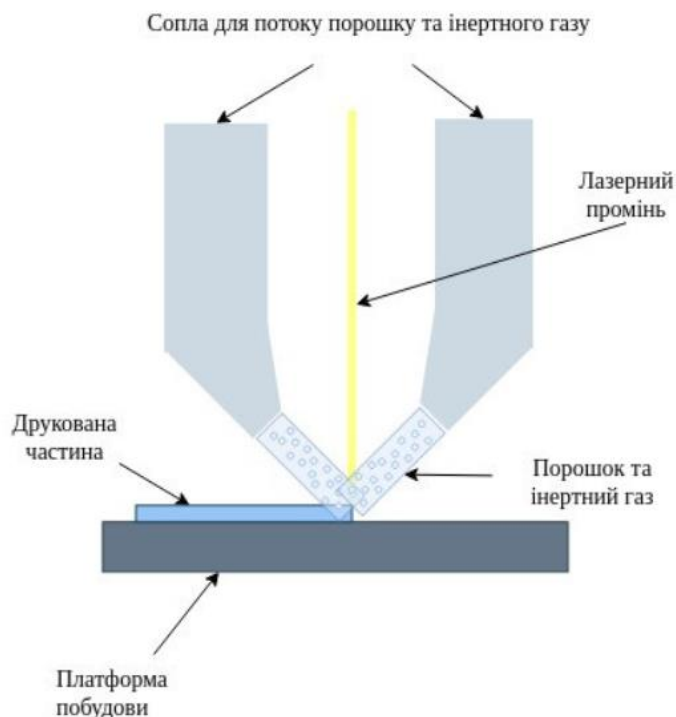


Рисунок 3.2 – Принцип роботи принтеру за технологією LENS Building

Стадії 1-3 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

В принтері працюючому за технологією EBAM (рис. 3.3) металевий зварювальний дріт подається через сопло і розплавляється електронним променем у місці контакту з зоною збірки.

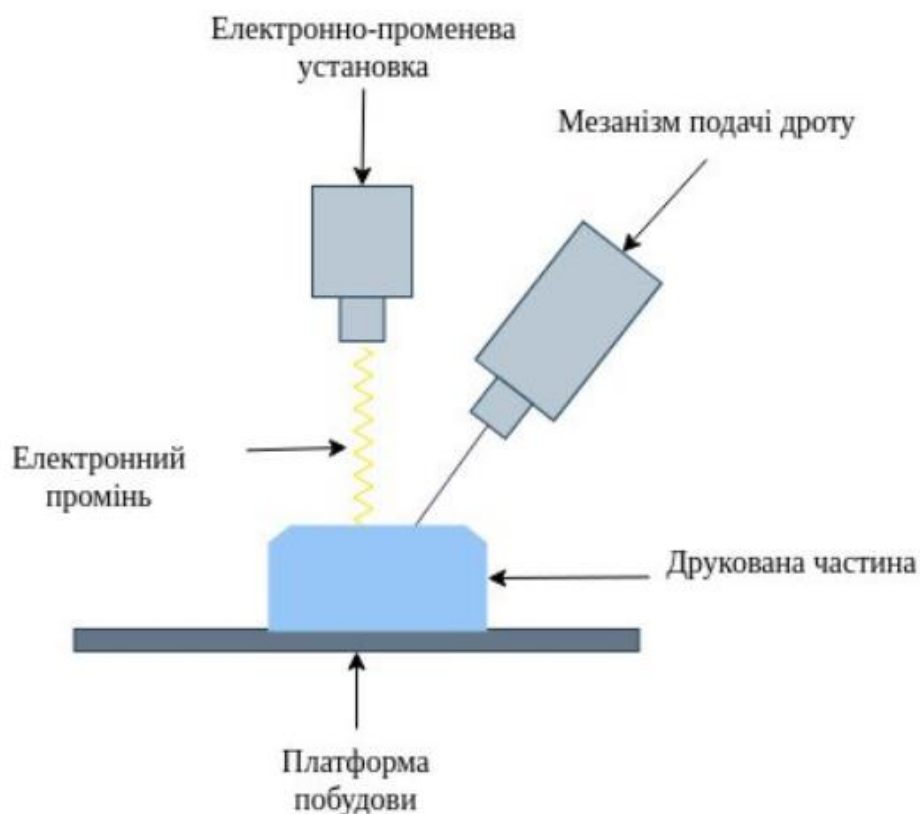


Рисунок 3.3 – Принцип роботи принтеру за технологією EBAM

Технологія LENS може друкувати як на поверхні металів так і кераміці, кераміка являється більш розповсюдженим матеріалом. Матеріали які можна використовувати для технологій LENS та EBAM містять практично будь-які метали та сплави які зварюються, такі як алюміній, сталь, титан, інконель, тантал, вольфрам, нікель та ніобій.

Недоліки DED технології:

- Supporting structures – конструкції, що використовуються для підтримання нависаючих частин (кут більше 75°). Використання конструкцій можливе але складне, оскільки великий басейн

рідкого розплаву в точні осадження не дозволяє робити випирання і ця ж властивість означає, що складні геометричні форми також неможливі;

- низька роздільна здатність у порівнянні з іншими 3d принтерами, які використовують технології друку металами, висота шару становить 250 - 5000 мкм;
- розмір частинок порошку складає від 50 до 150 мікрон, а дріт для зварювання варюється від 1 до 3 міліметрів у діаметрі.
- гострі кути можуть бути отримані лише у процесі постобробки, як правило на фрезерному станку ЧПУ;
- мають погану якість поверхні, що потребує вторинної обробки.

Велика кількість енергії, яка необхідна для підтримання температури розплаву в точці осадження, викликає великі теплові градієнти, що можуть викликати великі залишкові напруження, але DED технологія забезпечує отримання бездефектних виробів з механічними властивостями, які не поступаються кованим металевим виробам.

Одним із найважливіших секторів, у якому процес DED активно використовується для виробництва, є аерокосмічний сектор. Основною причиною, яка спонукає до використання процесу DED у цьому секторі, є можливість виробляти компоненти великих розмірів, на які у процесі традиційного виробництва витрачається дуже велика кількість енергії та сировини, при цьому швидкість нарощування матеріалу сягає 3 - 11 кг/год або 430-1570 см³/год.

Найпомітнішим досягненням в аерокосмічному секторі є запуск у космос, 24 березня 2023 року, компанією Relativity Space ракети, що надрукована з використанням DED процесу (рис. 3.4).

Перша ракета такого типу, що отримала ім'я «GLHF», стартувала з майданчика на мисі Канаверал. Ракета стала першим надрукованим на 3D-принтері об'єктом, який здійснив запуск у космос.

До цього, у 2003 році Північно-Західний політехнічний університет виготовив центральний лонжерон крила для пасажирського літака Сомаc C313, центральний лонжерон крила має довжину 5 м.

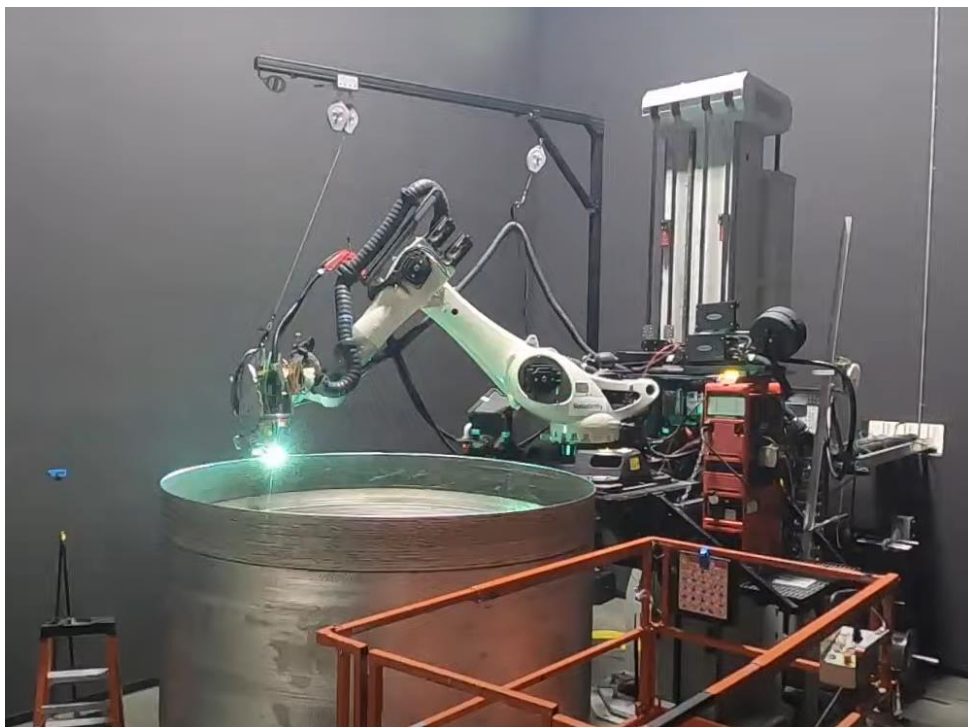


Рисунок 3.4 – Процес виготовлення елементів (www.relativityspace.com) та ракета на стартовому майданчику (Фото: Trevor Mahlmann)

Вартість принтерів за технологією DED сягає від 200 тис. до 5 млн. доларів США.

3.3. Екструзія матеріалів (ME)

Третій вид технологій адитивного виробництва це Material Extrusion (ME). Технологія є однією з найпоширеніших систем 3D друку, яка широко розглядалася більшістю дослідників в усьому світі. Статистичні дані наведені в Parandoush і Lin підкреслюють, що комерційні системи FDM (Fused Deposition Modeling) займали 41,5% частки ринку, із загальною кількістю проданих 15 000 машин до кінця 2010 року. Однак сьогодні майже неможливо порахувати продажі систем FDM, оскільки після краху патенту на технологію, який раніше належав Stratasys Inc., різні фірми почали виробництво економічно ефективних принтерів. В залежності від обладнання принтери мають продуктивність 720-4680 см³/год.

ME має високу спорідненість з DED технологією, ME обмежена використанням лиш синтетичних та штучних полімерів.

Принцип роботи принтеру за технологією типу FDM (Fused Deposition Modeling) або моделювання пошаровим наплавленням (рис. 3.5) можна розділити на такі стадії:

1. розплав філаменту та його проштовхування через розігріте сопло;
2. переміщення головки відповідно до траєкторії;
4. охолодження укладеного матеріалу;
5. формування готового шару деталі.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

Матеріалів, які використовуються для FDM друку велика кількість. Це і класичні ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол), PLA (Полілактид), PET-G (Поліетилентерефлатат-гліколь), PP (Поліпропілен), PC (Полікарбонат) та композитні (армовані) матеріали. Композити можуть бути армовані вуглецевими волокнами, скловолокнами або базальтовими волокнами. Це збільшує їх міцність на розрив, стиск, згин, сколювання та надає матеріалам

нові фізико-механічні властивості. Також існують композити з включенням металевого порошку, не так багато виробників які випускають такого роду матеріали.

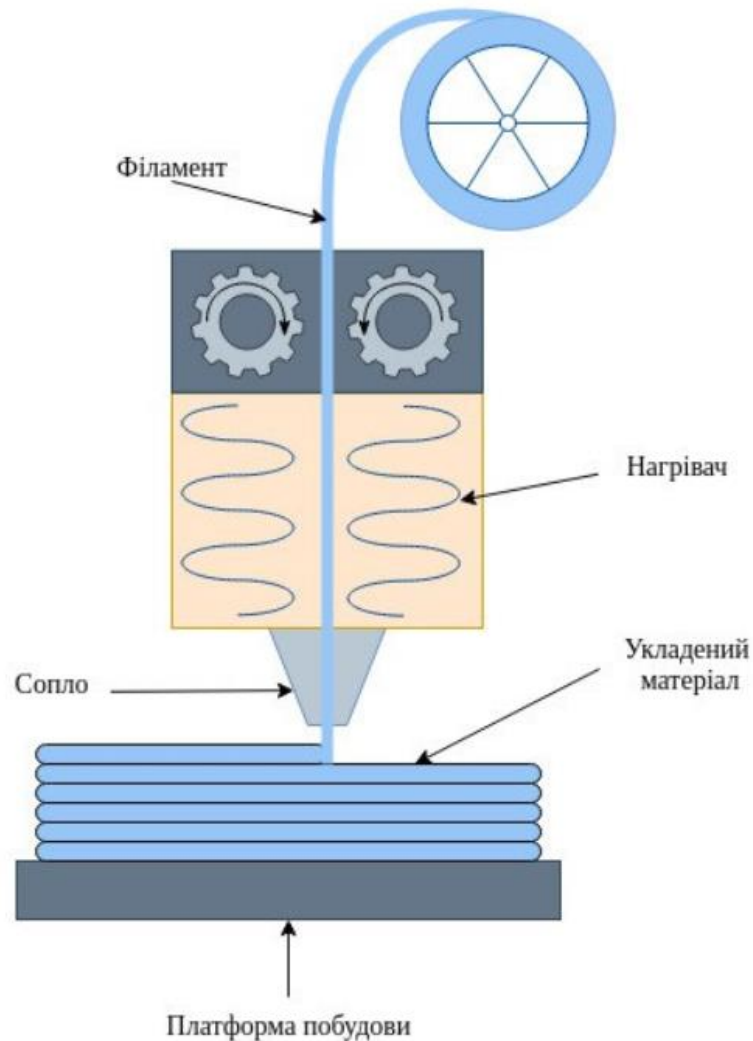


Рисунок 3.5 – Принцип роботи принтеру за технологією FDM

Окрім технології типу FDM до виду технології адитивного виробництва Material Extrusion відноситься і технологія друку типу FGF (Fused Granulate Fabrication) або побудова на нагріванні гранул, що подаються за допомогою шнека. Адитивне виробництво зі шнековою екструзією переважно використовується для швидкого виробництва великогабаритних виробів з використанням гранульованих термопластиків (рис. 3.6).

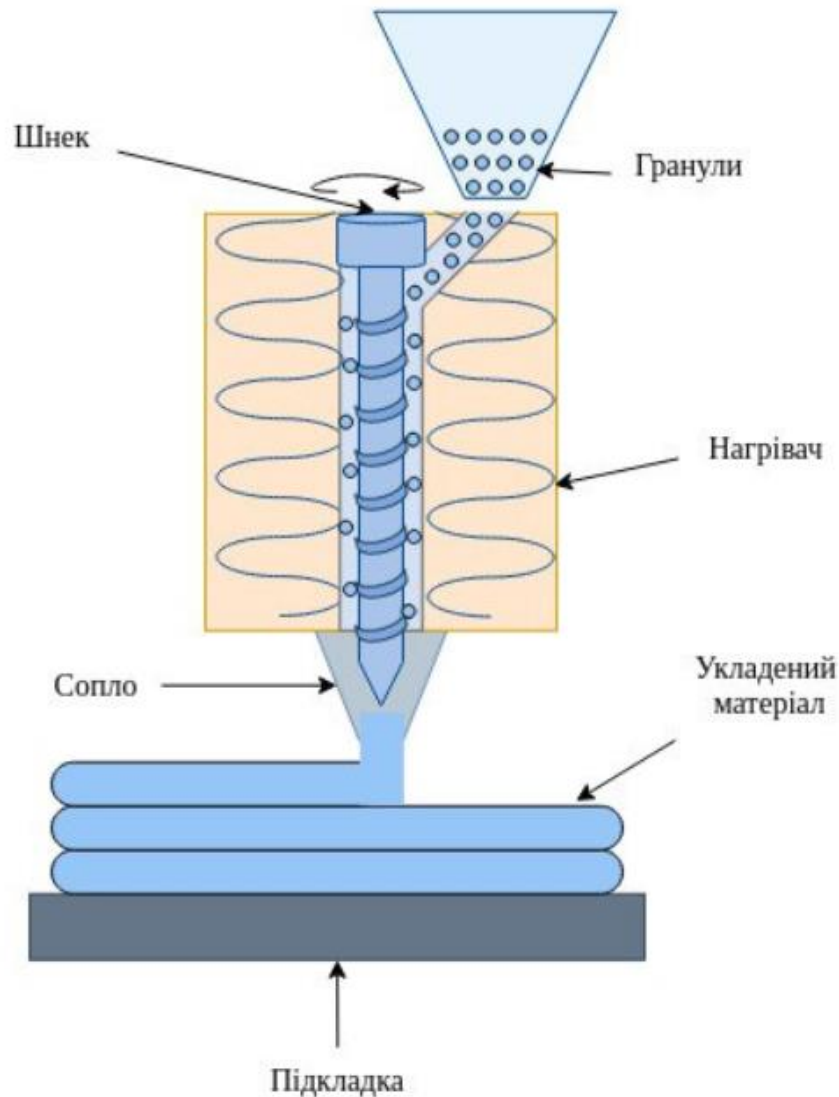


Рисунок 3.6 – Принцип роботи принтеру за технологією FGF

Дана технологія у якості сировини використовує початковий матеріал виробництва філаментів – гранули, значно зменшуючи витрати часу на виробництво. Робота з гранулами достатньо складна і поки ще не забезпечує тієї якості та контролю за процесом, які забезпечують принтери технології FDM. Найбільш значущою перевагою технології FGF є велика швидкість виробництва компонентів до $4380 \text{ см}^3/\text{год}$. У порівнянні з технологією FDM – до $1600 \text{ см}^3/\text{год}$.

Вартість принтерів за технологією ME сягає від 0,2 тис. до 400 тис. доларів США.

3.4. Струменеве нанесення матеріалу (MJ)

Четвертий вид технологій адитивного виробництва це Material Jetting (MJ). Подібно струменевому друку на в'язучому при струменевому друку – на поверхню наноситься шар матеріалу і створюється об'єкт.

Однак замість того, щоб наносити клей на шар порошку, MJ використовує воскоподібні матеріали, розплавляє їх і точково каплями наносить на поверхню друку і по мірі нарощування шарів об'єкт набуває своєї заданої форми. MJ принтер друкує модель шар за шаром, наносячи фотополімери з сотень дрібних сопел головки друку, кількість сопел залежить від конкретної моделі обладнання і змінюється від 96 до 448. Продуктивність технології в залежності від принтеру 900-2530 см³/год. MJ принтери наносять на платформу весь шар одразу, його висота становить 16 - 32 мкм. Коли краплі матеріалу опиняються на платформі вони обробляються ультрафіолетовим світлом і шар твердне (рис. 3.7). Всі опори моделі можна друкувати одночасно з самою моделлю, використовуючи при цьому розчинний матеріал. Коли виріб готовий, опори легко можна видалити за допомогою води під тиском або зануривши виріб в ультразвукову ванну.

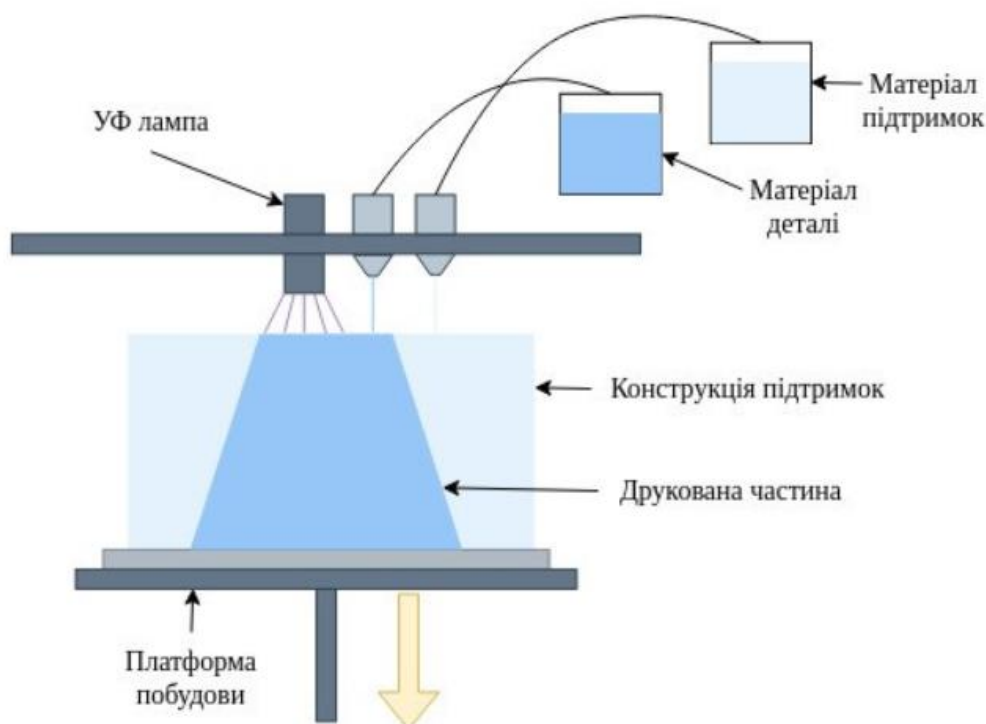


Рисунок 3.7 – Принцип роботи принтеру за технологією MJ

У даній технології використовуються різні за властивостями матеріали: жорсткі, тверді, прозорі, різнокольорові фотополімери.

Ще один тип технології, який відноситься до струменевого друку є NPG (Nano Particle Jetting) або струменевий друк наночастинками. У струменевому друці наночастинками використовується рідина, яка містить у собі наночастинки металів, які оператор завантажує в принтер у вигляді картриджу. Сопла принтеру розподіляють рідину по платформі струменем або невеликими краплями, в той час коли висока температура в середині корпусу призводить до випаровування рідини, після чого на платформі залишається лише шар з металу (рис. 3.8).

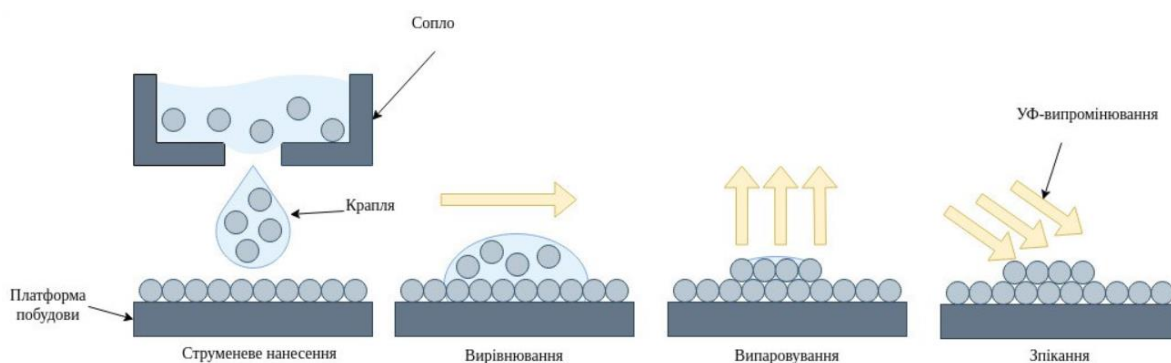


Рисунок 3.8 – Принцип роботи принтеру за технологією NPG

У якості матеріалів використовується нержавіюча сталь і кераміка.

Третій тип технології, який відноситься до струменевого друку є DOD (Drop-On-Demand) або наплавлення з вирівнюванням шару летючим різцем.

У DOD принтерів є дві друкуючі головки. Перша розподіляє воскоподібний матеріал на платформі, а друга створює опори з розчинного матеріалу. Подібно до FDM та SLA принтерів, головки слідуєть попередньо заданій траєкторії і розподіляють матеріал точково. У принтерах DOD використовується різець для вирівнювання кожного шару, для покращення якості друкованих деталей необхідно створювати рівну поверхню перед друком наступного шару (рис. 3.9).

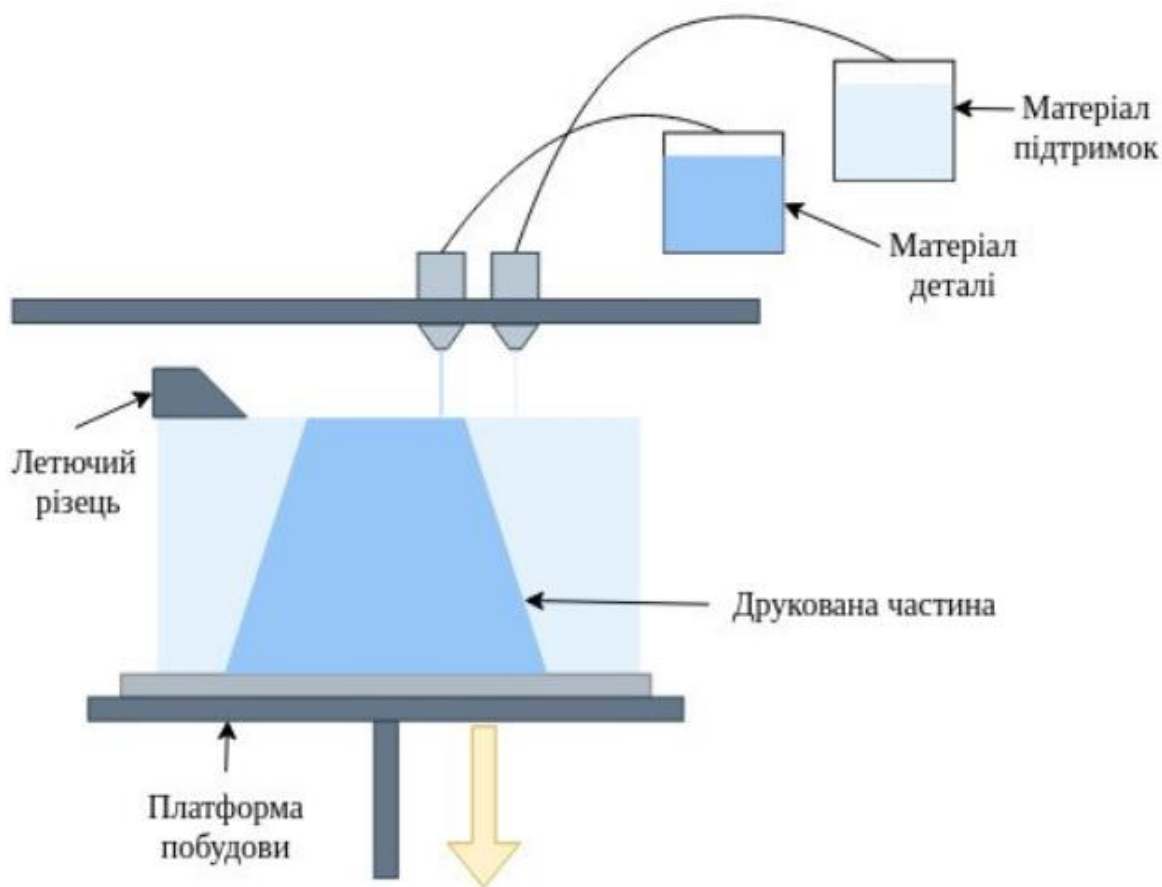


Рисунок 3.9 – Принцип роботи принтера за технологією DOD

Вартість принтерів за технологією MJ сягає від 20 тис. до 600 тис. доларів США.

3.5. Синтез на підкладці (PBF)

П'ятий вид технологій адитивного виробництва це Powder Bed Fusion (PBF) або синтез на підкладці. Друк відбувається за допомогою термічної обробки порошкоподібного матеріалу.

Під тепловим впливом порошок шар за шаром твердне, спікається тим самим утворюється модель. Методи PBF відрізняються між собою різноманітними джерелами енергії та типами порошків, які використовуються. Більшість PBF принтерів обладнані механізмом для розгладжування тонкого шару порошку, товщиною 30 - 120 мкм. Швидкість друку невелика у порівнянні з іншими технологіями і складає 30-400 см³/год.

Після друку деталь, яка затвердла дістається, а порошок, який залишився, можна використовувати вторинно.

Технологія типу SLS (Selective Laser Sintering) або селективного (вибіркового) лазерного спікання дозволяє створювати міцні пластикові деталі за допомогою спікання тонких шарів порошку лазером шар за шаром. У якості витратного матеріалу використовують полімери та кераміку.

Принцип роботи принтеру за технологією SLS (рис. 3.10) можна розділити на такі стадії:

1. нанесення на платформу першого шару матеріалу;
2. спікання порошку лазером згідно до геометрії моделі;
3. опускання платформи на товщину шару;
4. нанесення нового шар матеріалу.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого готову деталь дістають з робочої області, очищають і при необхідності піддають вторинній обробці.

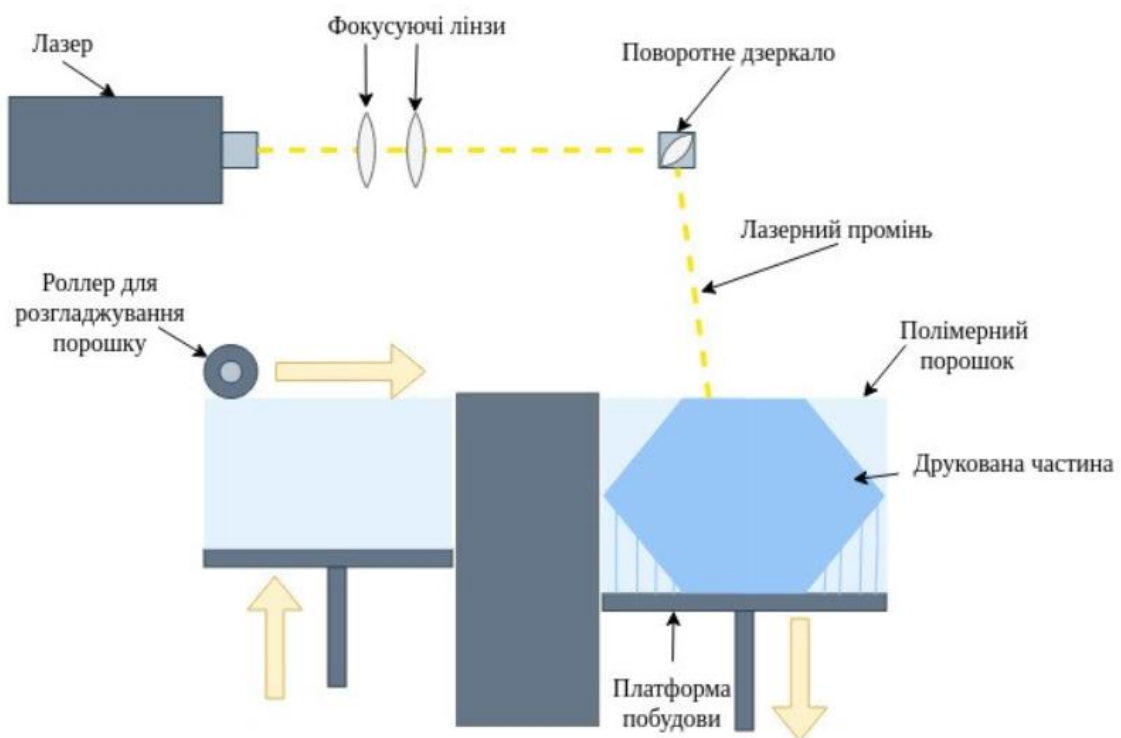


Рисунок 3.10 – Принцип роботи принтеру за технологією SLS

Технологія типу MJF (Multi Jet Fusion) або мультиструменева плавка – це, по суті, комбінація технологій SLS та MJ.

Принцип роботи принтеру за технологією MJF (рис. 3.11) можна розділити на такі стадії:

1. головка друку з соплами аналогічними соплам 2d принтеру розповсюджує в'язучу речовину на тонкий шар порошкоподібного пластику, який засипаний у спеціальну ємність;
2. по межах шару моделі сопла друкують речовиною, яка запобігає процесу спікання, так як створюється контур шару;
3. потужне джерело інфрачервоного випромінювання проходить над ємністю з порошком і спікає зони вкриті в'язучою речовиною;
4. опускання платформи на товщину шару;
5. нанесення нового шар матеріалу.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

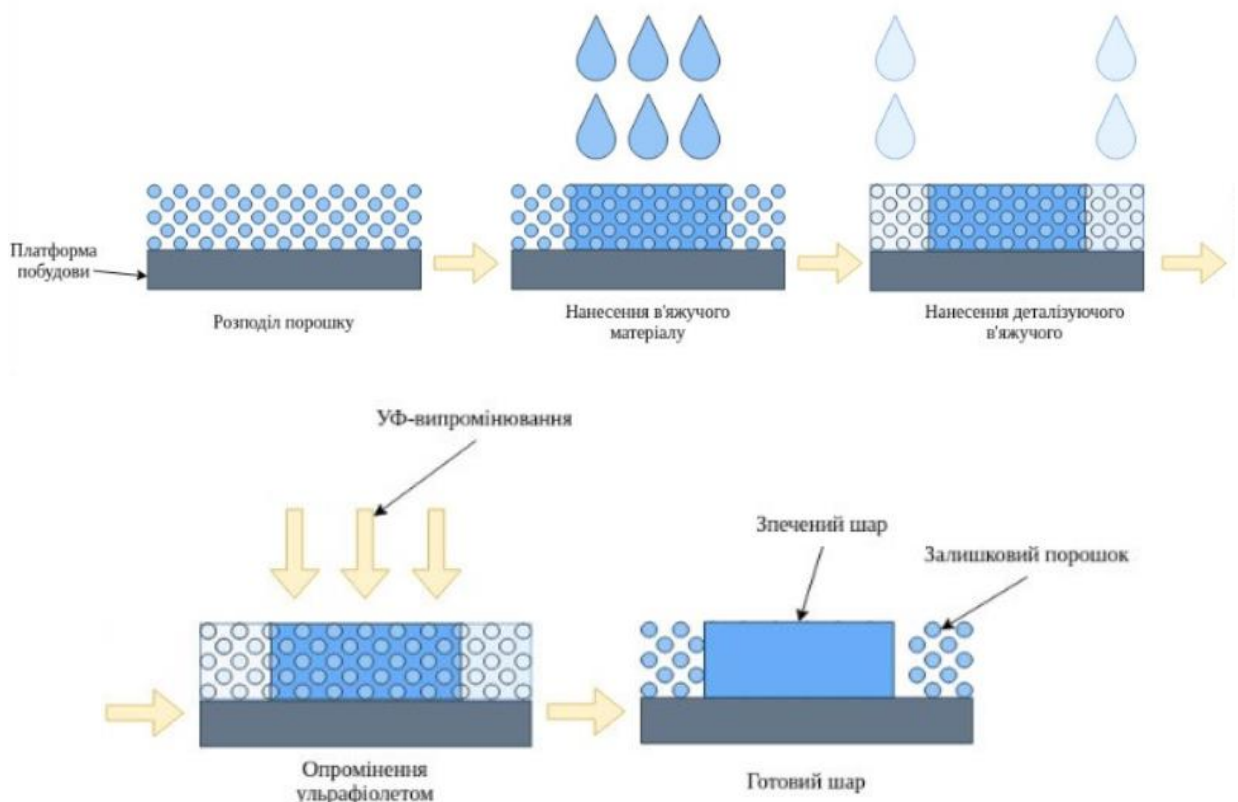


Рисунок 3.11 – Принцип роботи принтеру за технологією MJF

Технологія типу SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) або селективної (вибіркової) лазерної плавки, або прямого лазерного спікання металів працює за таким самим принципом, що і SLS принтери тільки з металевого порошку (рис. 3.12). SLM передбачає собою повну плавку порошку в той час як DMLS розігріває порошок майже до температури плавлення і часточки порошку сплаваються через хімічну реакцію.

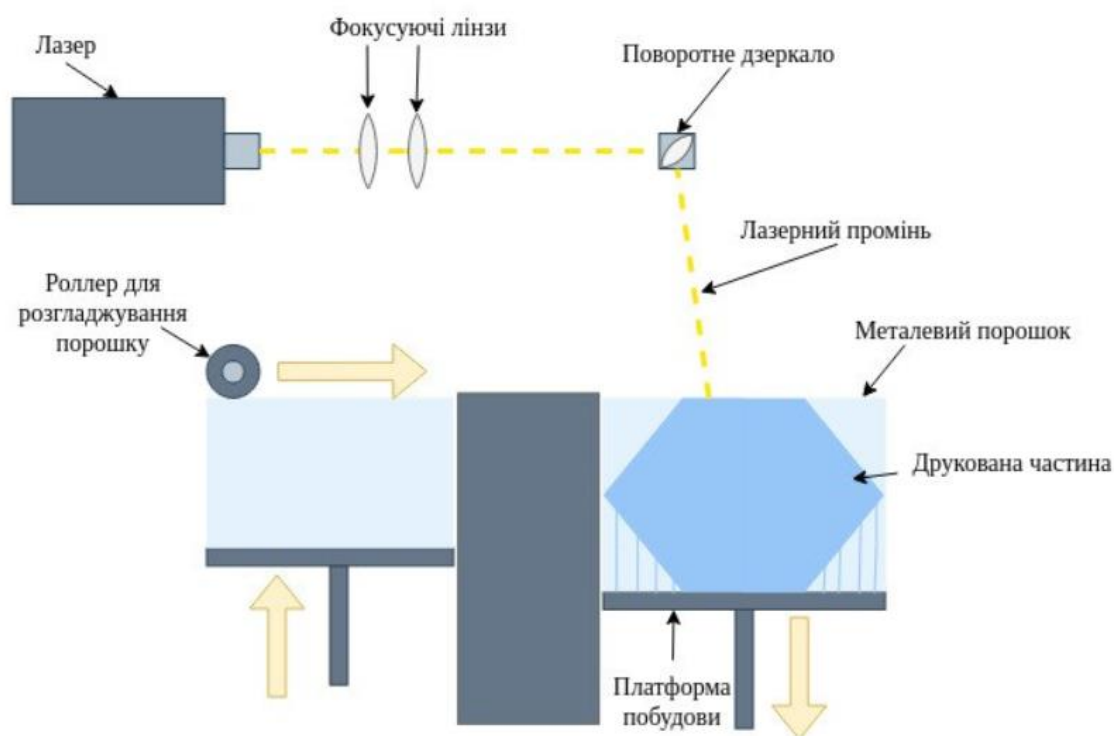


Рисунок 3.12 – Принцип роботи принтеру за технологією SLM/DMLS

При DMLS друку використовуються нікелієві сплави, титан та інші. SLM принтери можуть працювати і з чистими металами, наприклад алюмінієм. SLM і DMLS моделі друкуються з опорами, щоб запобігти деформації роздрукованої деталі від залишкового механічного напруження.

Технологія типу EBM (Electron Beam Melting) або електронно-променева плавка. Принтери EBM використовуються для друку металевих об'єктів. Принцип роботи технології (рис. 3.13) можна розділити на такі стадії:

1. у робочу камеру засипається металевий порошок;
2. принтер плавить порошок потужним електронним випромінювачем шар за шаром згідно поперечним перерізам цифрової моделі;

Стадії 1-2 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

Весь процес відбувається у вакуумі. Електронно-променевий друк не вимагає побудови опорних конструкцій для моделі зважаючи на відсутність залишкових механічних напружень, які виникають в результаті наявності градієнту температур між охолодженими та гарячими шарами. Окрім того, ЕВМ використовує менше енергії і може виготовляти шари швидше ніж SLM/DMLS але якість даних моделей гірша.

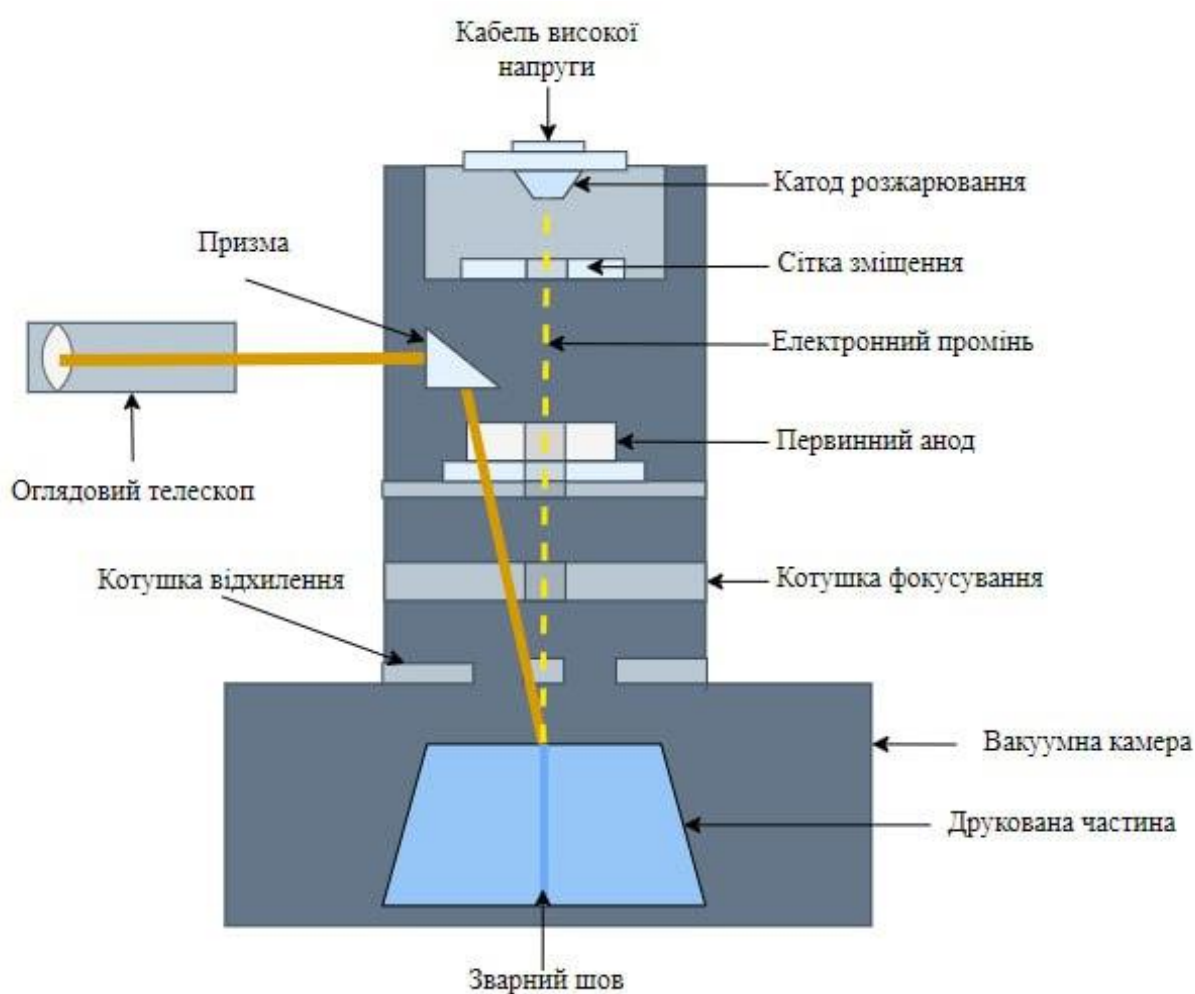


Рисунок 3.13 – Принцип роботи принтеру за технологією ЕВМ

Вартість принтерів за технологією PBF сягає від 20 тис. до 2 млн. доларів США.

3.6. Листова ламінація (SL)

Шостий вид технологій адитивного виробництва це Sheet Lamination (SL) або листова ламінація. Ламінування листів відоме також як ультразвукове адитивне виробництво або виробництво ламінованих об'єктів.

Це процес адитивного виробництва при якому тонкі листи матеріалу, 70 - 200 мкм, укладаються стопкою і з'єднуються разом за допомогою ультразвукового зварювання, склеювання або пайки. По мірі укладання шарів об'єкт набуває форму. Коли всі шари укладені і ламіновані станок з ЧПУ або лазерний різак видаляє надлишковий матеріал створюючи кінцеву форму об'єкта.

Технологія друку LOM (Laminated Object Manufacturing), друк об'єктів шляхом ламінування є досить тривалим, швидкість формування виробу складає 30-320 см³/год.

Принцип роботи принтеру за технологією LOM (рис. 3.14) можна розділити на такі стадії:

1. на платформу, або готові об'єкти розігрітим роллером наклеюється лист матеріалу;
2. лазер вирізає об'єкт по контуру згідно геометрії моделі;
3. залишки матеріалу видаляються;
4. платформа опускається і наступний лист клейкого матеріалу подається до робочої камери;
5. платформа піднімається вверх і новий шар прилипає до попереднього.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

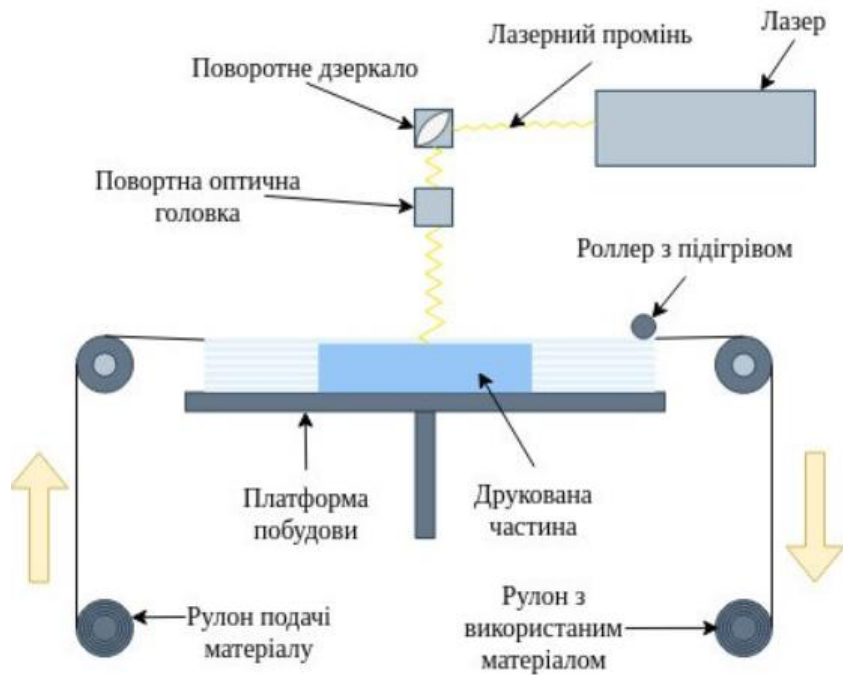


Рисунок 3.14 – Принцип роботи принтеру за технологією LOM

Вартість принтерів за технологією SL сягає від 9 тис. до 37 тис. доларів США.

3.7. Фотополімеризація у ванні (VP)

Сьомий вид технологій адитивного виробництва це Vat Photopolymerization (VP) або фотополімеризація у ванні. У даному типі технології фотополімерна смола твердне під впливом джерела світла з різною довжиною хвилі і весь цей процес носить назву фотополімеризація. Швидкість побудови за даною технологією складає 192-600 см³/год

Технологія SLA (Stereolithography) або стереолітографія відноситься до виду адидитивного виробництва VP.

Принцип роботи принтеру за технологією SLA (рис. 3.15) можна розділити на такі стадії:

1. платформа, на якій тримається майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою;
2. один або декілька точкових лазерів, які розташовані в середині принтеру, починають засвічувати знизу ті зони, які згідно

тривимірної цифрової моделі повинні тверднути для створення шару деталі;

3. формування першого шару об'єкта;
4. підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого роздрукована деталь промивається і, як правило, піддається додатковому ультрафіолетовому опроміненню поза межами принтеру для завершення процесу фотополімеризації і збільшення міцності об'єкту.

Деталі роздруковані SLA у своїй більшості вимагають наявності опор для нависаючих елементів моделі, які додаються до цифрової моделі перед друком, після чого видаляються вручну по завершенню постобробки виробу ультрафіолетовим випроміненням.

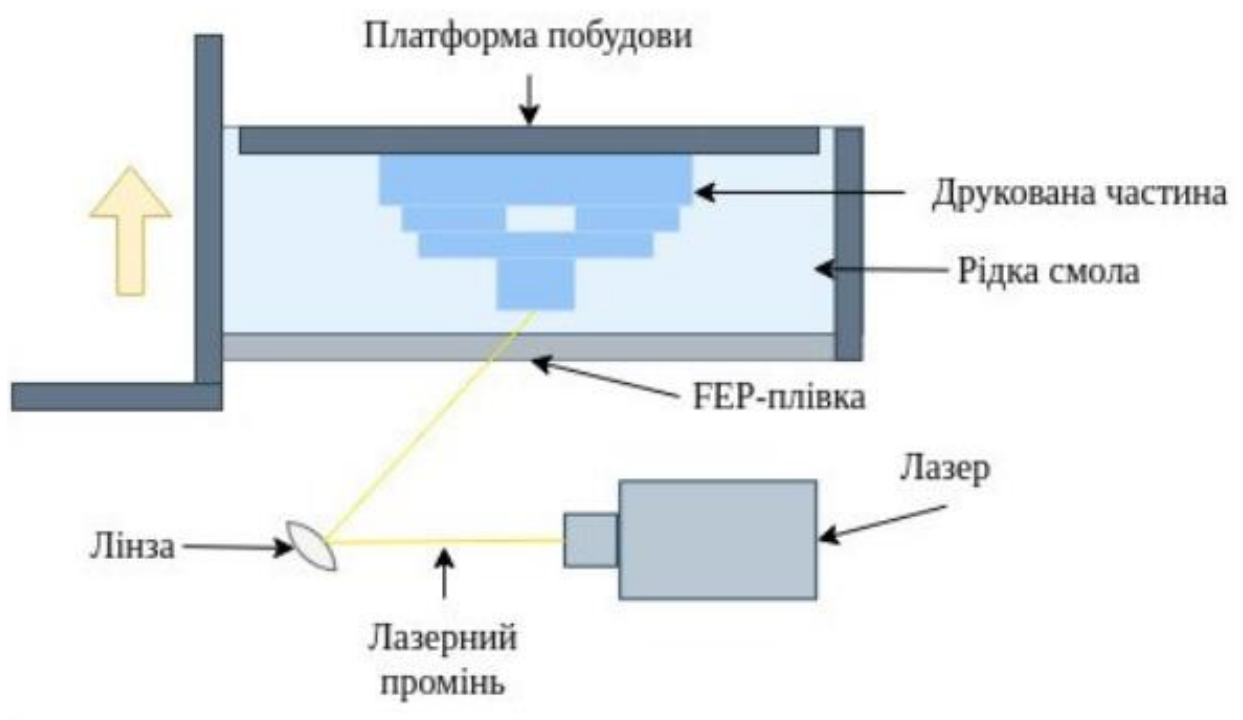


Рисунок 3.15 – Принцип роботи принтеру за технологією SLA

Альтернативною і більш дешевою технологією є технологія DLP (Direct Light Processing) або цифрова світлодіодна проекція. Технологія друку DLP дуже схожа на SLA, різниця у тому, що замість дорогих точкових лазерів у

DLP принтерах використовують цифрову світлодіодну проекцію для опромінення всього шару.

Принцип роботи принтеру за технологією DLP (рис. 3.16) можна розділити на такі стадії:

1. платформа, на якій триматиметься майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою;
2. цифровий проектор передає проекцію зображення цілого шару на рідку фотополімерну смолу до її повного затвердіння;
3. формування першого шару об'єкта;
4. підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

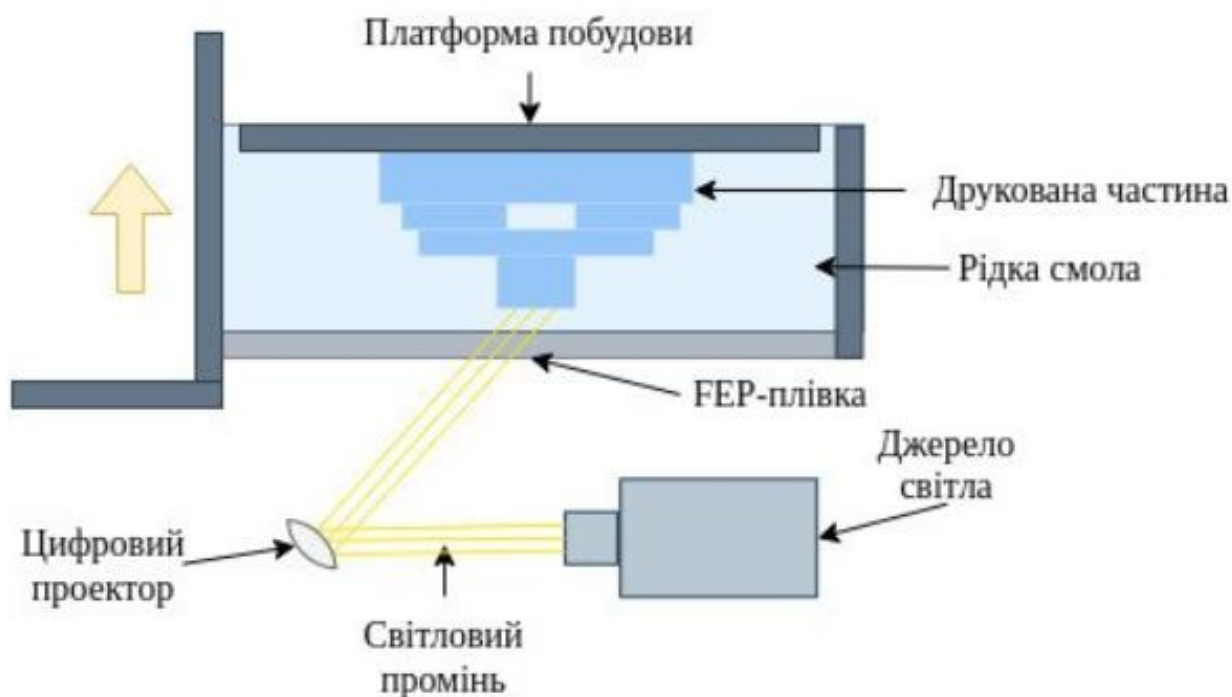


Рисунок 3.16 – Принцип роботи принтеру за технологією DLP

Технологія типу CDLP (Continuous Direct Light Processing) або безперервна цифрова світлодіодна проекція. Технологія така сама, як і у DLP, єдина відмінність це те, що друк передбачає постійний рух платформи вгору вздовж осі Z, що збільшує швидкість виробництва моделей до 1500 см³/год.

Питання для самоконтроля

- 1. Які методи відносяться до технології Directed Energy Deposition (DED)?*
- 2. Які методи відносяться до технології Powder Bed Fusion (PBF)?*
- 3. Якими недоліками характеризують NPJ технологію?*
- 4. Якими недоліками характеризують FGF технологію?*
- 5. Якими недоліками характеризують FDM технологію?*
- 6. Яка технологія друку металами забезпечує більшу продуктивність, а ніж ливарний процес?*

РОЗДІЛ 4. Дизайн та моделювання

4.1. Програмне забезпечення для дизайну та моделювання

Програмне забезпечення (ПЗ) для дизайну та моделювання є важливою складовою процесу адитивного виробництва. ПЗ дозволяє користувачам створювати, редагувати та обробляти цифрові моделі перед друком. Від вибору ПЗ залежить якість та точність розробленої моделі.

Програмне забезпечення для моделювання виробів у адитивному виробництві обирається на основі наступних критеріїв:

- функціональність;
- доступність;
- простота використання;
- багатозадачність.

Кожне ПЗ має свої особливості застосування, алгоритми роботи та можливості. Розглянемо лише основні можливості та інтерфейси розповсюдженого ПЗ.

4.1.1. Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 - це комплексне ПЗ для промислового дизайну та моделювання (рис. 4.1), що включає в себе CAD, CAM, CAE та PCB функції.

Панель даних: надає доступ до команд, проектів і дизайнів, керування даними проектів.

Панель додатків: містить загальноприйняті функції, такі як новий файл, скасувати, повернути.

Панель інструментів: вибір робочого середовища, у якому ви хочете працювати. Інструменти на панелі інструментів відрізняються в кожному робочому просторі.

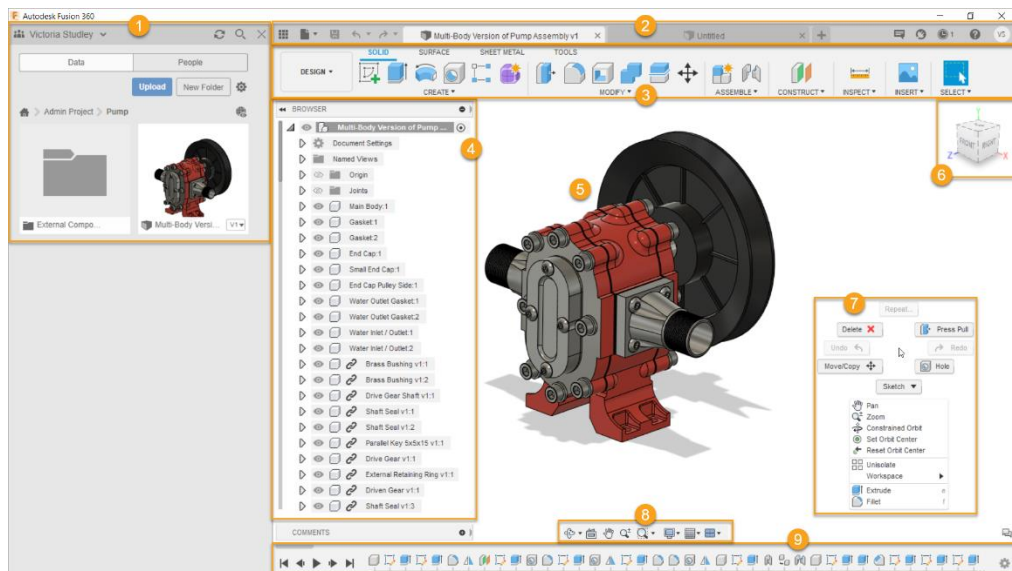


Рисунок 4.1 – Робочі області Fusion 360: 1) панель даних; 2) панель додатків; 3) Панель інструментів; 4) Браузер; 5) Збірка на полотні; 6) ViewCube; 7) Меню позначення; 8) Панель навігації; 9) Хронологія.

Панель інструментів розділена на вкладки, які організовують інструменти в логічні групи.

- **Робочі області:** Fusion 360 використовує робочі області для керування доступними командами та типом даних, які ви створюєте.
- **Вибір робочої області:** вибір назви поточної робочої області для переходу між робочими областями.
- **Вкладки:** кожна робоча область розділена на вкладки, які містять логічні групи пов'язаних інструментів.
- **Контекстні вкладки:** деякі команди активують контекстну вкладку, наприклад Sketch. Контекстна вкладка відображається на панелі інструментів поряд з іншими вкладками в робочій області, поки контекстні інструменти активні.
- **Контекстне середовище:** деякі команди активують контекстне середовище. Контекстне середовище відображається на панелі інструментів, і його вкладки замінюють типові вкладки в

поточному робочому просторі, доки ви не вийдете з контекстного середовища.

Браузер: перелік об'єктів у збірці (компоненти, тіла, ескізи, походження, з'єднання, геометрія конструкції тощо) і дозволяє контролювати видимість об'єктів.

Збірка на полотні: дає можливість обрати об'єкти зі збірки на полотні.

ViewCube: інструмент для перегляду обраного об'єкту з різних позицій.

Меню позначень: містить часто використовувані команди та додаткові команди в меню.

Панель навігації: містить команди, які використовуються для масштабування, панорамування та позиціонування дизайну, а також параметри відображення для керування зовнішнім виглядом інтерфейсу та тим, як збірки дизайну відображаються на полотні.

Хронологія: перелік операцій, виконаних у проекті. В режимі параметричного моделювання дає можливість змінити порядок їх обчислення.

Розглянуте ПЗ може використовуватися для параметричного моделювання складних інженерних конструкцій. Має можливість збереження проектів в форматі, що підтримують програми для підготовки до друку. Особливістю цього ПЗ, як і SolidWorks, є спрямованість лише на проектування інженерних об'єктів.

4.1.2. SolidWorks

SolidWorks - це програмне забезпечення, що забезпечує широкі можливості для 3D-моделювання, аналізу та виробництва (рис. 4.2).

Панель інструментів: містить основні команди, зокрема «Новий документ», «Відкрити документ» і «Зберегти документ». Крім того, у правій частині цієї панелі інструментів доступна піктограма шестірні, яка відкриває діалогове вікно «Параметри системи», де можна змінити різноманітні налаштування. Якщо навести курсор на піктограму SOLIDWORKS, ви побачите кілька випадаючих меню, які містять усі доступні команди,

включаючи меню «Довідка», де можна отримати доступ до навчальних посібників.

Пам'ятайте, якщо навести курсор на будь-яку піктограму в SOLIDWORKS, відобразиться підказка з поясненням команди чи інструмента!

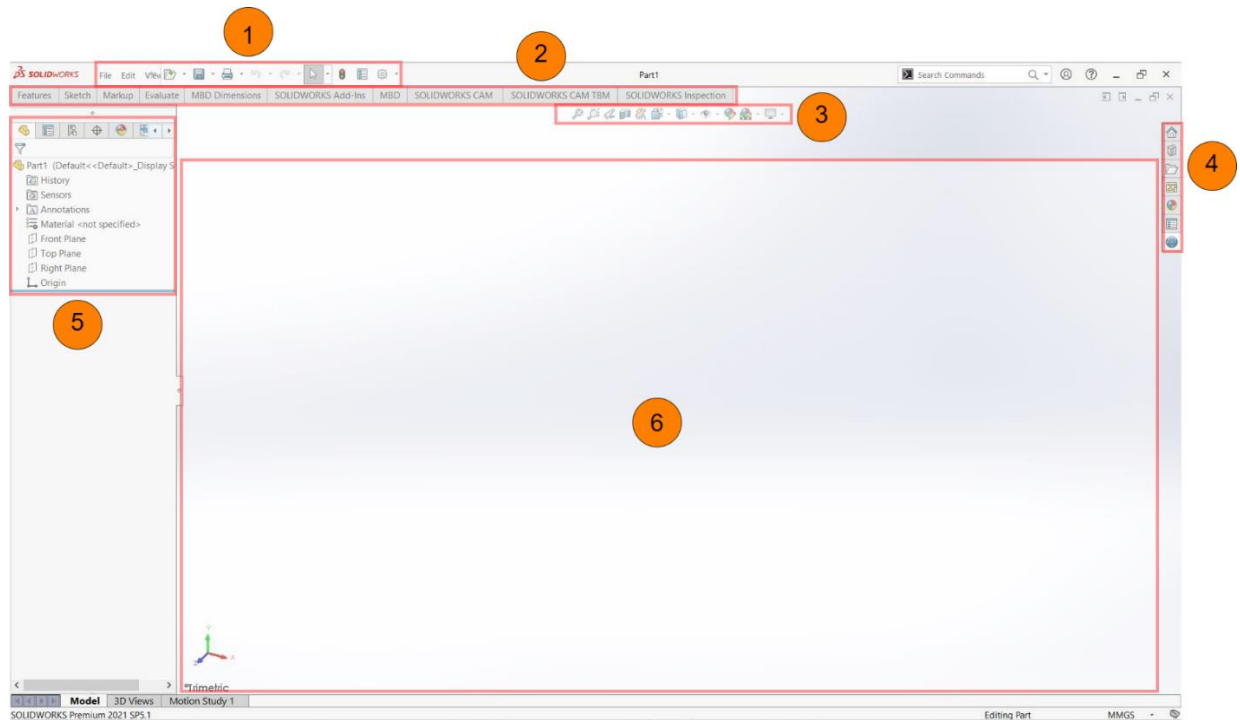


Рисунок 4.2 – Робочі області SolidWorks. 1) Панель інструментів; 2) CommandManager; 3) Heads Up View панель інструментів; 4) Панель завдань; 5) Дерево проектування FeatureManager; 6) Область графіки.

CommandManager: контекстно-залежна панель інструментів, яка надає різні набори команд на основі вкладки, вибраної безпосередньо під нею. Це основна область, де користувачі можуть обрати команди для створення ескізів, додавання/видалення матеріалу, серед багатьох інших. У багатьох випадках SolidWorks автоматично перемикається на відповідну вкладку CommandManager під час зміни режимів, однак може знадобитися вручну перемикатися між вкладками, натискаючи їх.

Heads Up View панель інструментів: прозора панель інструментів у верхній частині графічної області надає ряд елементів керування для керування кольорами та зовнішнім виглядом моделі, а також точки зору на них. Функції, які зазвичай використовуються тут, включають пристосування

моделі до екрана, зміну орієнтації перегляду, зміну стилю відображення (затінений контур, каркас тощо) і застосування кольорів/вигляду до моделі.

Панель завдань: містить кілька вкладок, які служать різним цілям. Залежно від інших програм, які були інстальовані додатково до SolidWorks, користувач може мати більшу або меншу кількість вкладок.

Дерево проектування FeatureManager: хронологічна ієрархія всіх ескізів і елементів, які були створені або застосовані до моделі, і з'являються відразу після початку роботи. Цей розділ інтерфейсу надзвичайно важливий, оскільки з нього походять багато операцій редагування. Тут також розміщено три площини за замовчуванням, які є базовою геометрією для першої операції.

Область графіки: основна область екрана, де моделі та креслення переглядаються, керуються та вибираються.

4.1.3. Blender

Blender - це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом для 3D-моделювання, анімації та візуалізації.

Меню цього ПЗ (рис. 4.3) інтуїтивно зрозуміле, блоки логічно сформовані і при цьому несуть величезні можливості для налаштування. Розглянемо основні блоки управління.

Меню: відкриває початкову заставку, відомості про версію та продукт, встановлення нових шаблонів програми, варіанти керування файлами, відновлення файлів проекту, робота з конвертування, очистка, створення нових робочих вікон, перемикання між робочими областями.

Робочі простори: попередньо визначені макети вікон, що відповідають за функціональні можливості ПЗ і поділені за видами.

Об'єктний режим: режими дозволяють редагувати різні аспекти об'єктів. Обираючи певний режим користувач отримує можливість проводити операції над всією деталлю, або отримує доступ до роботи з окремими площинами, ребрами та вузлами обраної деталі.

Відображення та затінення: керування типами відображень, керування затіненням вікна перегляду. Меню надає вибір ступеня детальності та реалістичності відображення об'єкта моделювання.

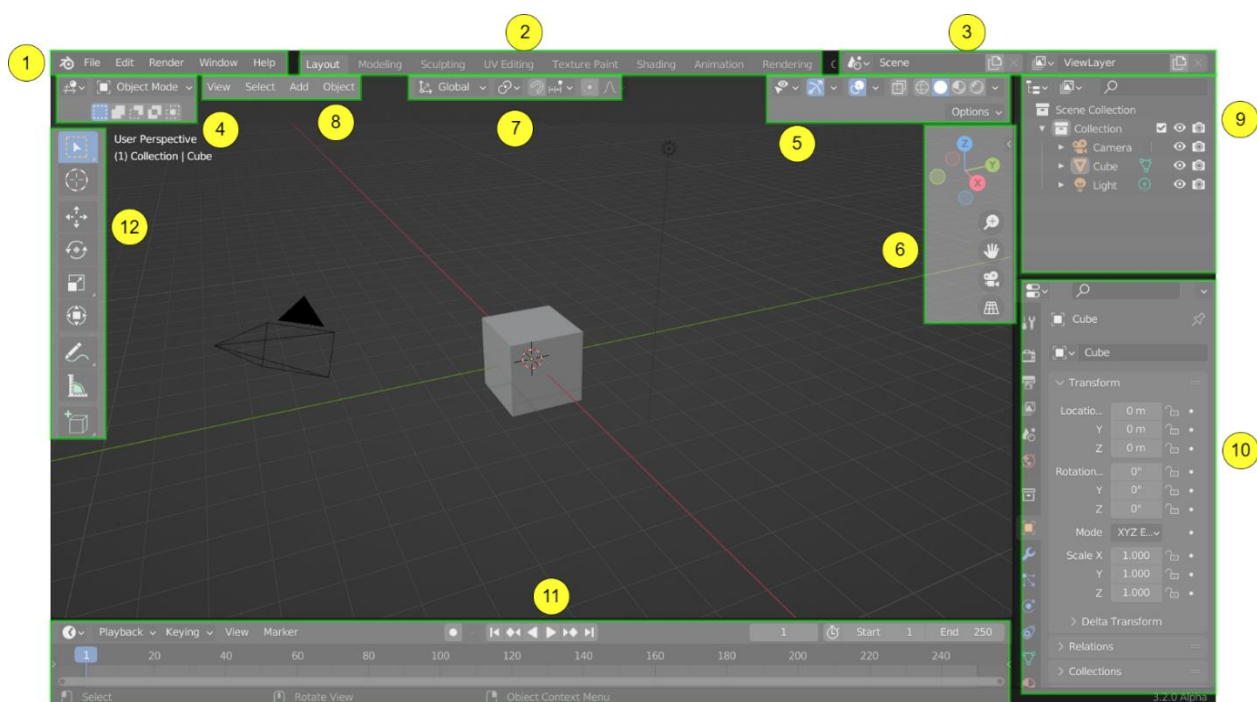


Рисунок 4.3 – Робочі області Blender. 1) Меню; 2) Робочі простори; 3) Блоки сцен та шарів перегляду; 4) Об'єктний режим; 5) Відображення та затінення; 6) Навігація; 7) Елементи керування; 8) Базова панель інструментів; 9) Outliner; 10) Властивості; 11) Хронологія; 12) Оператори маніпуляції з об'єктом.

Навігація: відповідає за можливість змінювати точку огляду об'єкту. Містить у собі такі функції: орбіта, кут нахилу, панорамування, масштабування виду, камера.

Елементи керування: перетворення орієнтації, опорні точки їх редагування та прив'язка, параметри прив'язки, пропорційне редагування.

Базова панель інструментів: відповідає за додавання стандартних елементів моделювання, таких як геометричні фігури, джерела освітлення, фотокамери.

Outliner: список, який упорядковує дані моделі та надає можливість орієнтування у взаємозв'язках між її елементами.

Властивості: показують і дозволяють редагувати багато активних даних, включаючи активну сцену та об'єкт. Властивості мають кілька категорій, які можна вибрати за допомогою вкладок і містять у собі: об'єкт, дані об'єкта, панель редактора, матеріал, модифікатори, тощо.

Хронологія: редактор шкали часу, позначений піктограмою годинника, використовується для маніпулювання ключовими кадрами як в режимі візуалізації так і режимі створення відео потоку.

Оператори маніпуляції об'єктом: панель переміщення, обертання, масштабування, малювання, що змінюється в залежності від обраного робочого простору.

Дане ПЗ має дещо складнішу систему моделювання об'єктів, проте дозволяє займатися одночасно параметричним моделюванням та скульптингом.

4.1.4. SketchUp

SketchUp - це простий у використанні ПЗ для створення 3D-моделей та рендерингу.

Головне призначення цього ПЗ полегшити роботу над швидкими замальовками до проєкту. Тому ПЗ має максимально просте меню з винесеними по контуру робочого простору найчастіше вживаними командами (рис. 4.4).

Основні можливості SketchUp зосереджені в наступних панелях.

Меню: відображає більшу частину інструментів, команд і налаштувань SketchUp.

Стандартна панель інструментів: містить різноманітні інструменти, які допомагають керувати файлами та кресленнями, а також друком та довідковими даними.

Панелі інструментів: з'являється під меню та вздовж лівої частини програми, містить набір інструментів і елементів керування, які можуть бути налаштовані користувачем.

Рядок стану: довга сіра прямокутна область у нижній частині вікна креслення. Ліва частина рядка стану містить командні рядки та повідомлення про стан SketchUp.

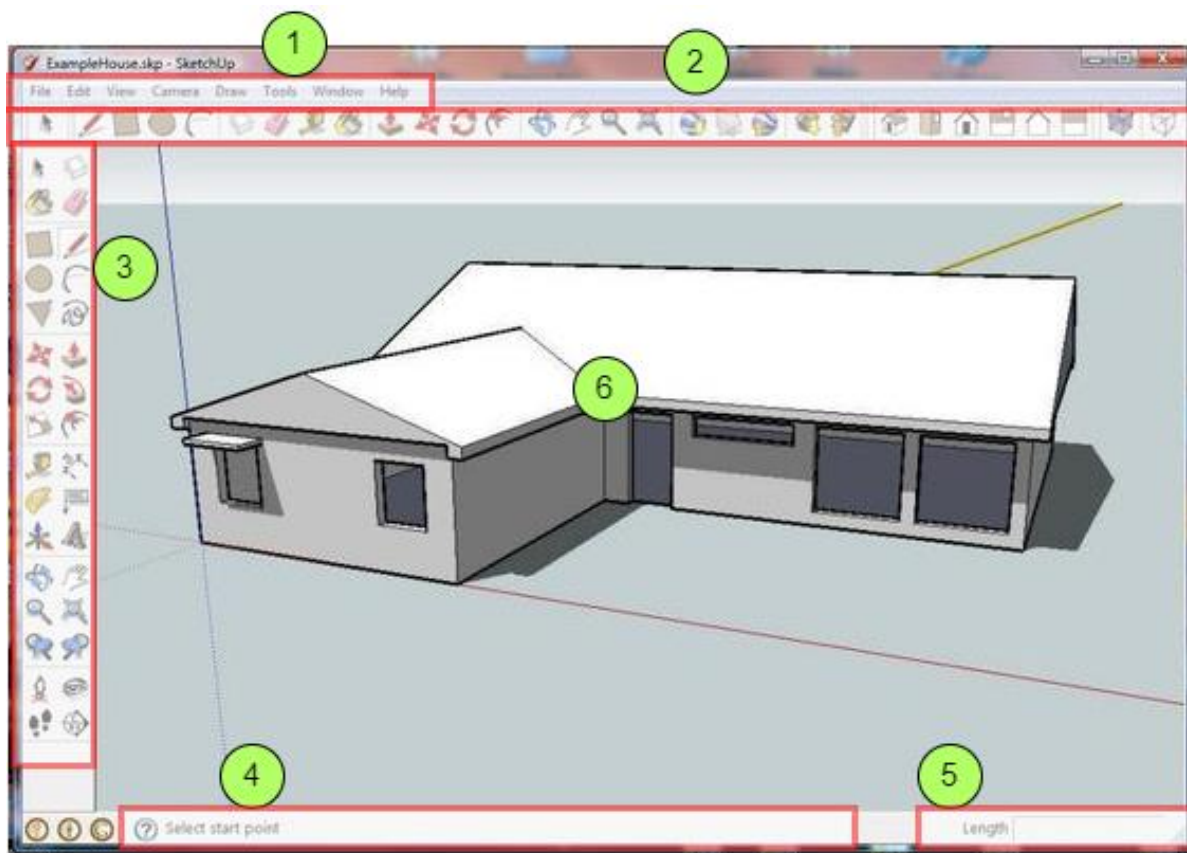


Рисунок 4.4 – Робочі області SketchUp. 1) Меню; 2) Стандартна панель інструментів; 3) Панелі інструментів; 4) Рядок стану; 5) Поле керування значеннями; 6) Вікно малювання.

У правій частині рядка стану міститься поле керування значеннями (ПКЗ). ПКЗ відображає інформацію про розміри під час малювання, а також може приймати введені значення. Поле керування значенням має дві функції: перша — це динамічне відображення розмірної інформації, як-от довжина або радіус, для об'єкта під час його створення або переміщення. Другий — змінити або повторно вказати розміри геометрії або значення команди.

Вікно малювання: увікні малювання ви створюєте та візуалізуєте свою модель.

Це далеко не повний перелік ПЗ для створення 3D моделей, але ці програми є досить популярними серед професіоналів та початківців. Обираючи ПЗ, користувачі повинні враховувати свої потреби та рівень знань у цій області.

Всі продукти, окрім SolidWorks, мають безкоштовну некомерційну версію для власного користування.

4.2 Розробка та оптимізація дизайну для адитивного виробництва

Загальні основи проектування у адитивному виробництві

Проектування у сфері адитивного виробництва передбачає використання спеціальних програм та технік для створення 3D-моделей та перетворення їх у реальні фізичні об'єкти.

Зважаючи на те, що в адитивному виробництві використовуються різні технології та матеріали, кожна з них має свої особливості та вимоги до проектування. Проте, є деякі загальні основи, які можна використовувати для будь-якої технології та матеріалу. Основні етапи проектування у адитивному виробництві наведено на рис. 4.5 та включають наступні кроки:



Рисунок 4.5 – Основні етапи проектування у адитивному виробництві.

Детально наведені етапи прослідковуються при проектуванні деталей авіаційної, космічної та автомобільної галузей, де головними параметрами оптимізації виступають, не лише міцність, а ще й вага, ергономічність, технологічність, екологічність та ціна.

4.3 Програмне забезпечення для підготовки деталі до друку

У виробництві підготовка деталей до друку є важливою складовою процесу. Перш ніж друкувати об'єкт, необхідно підготувати 3D-модель, виконати її оптимізацію, розмістити у області побудови деталі, налаштувати параметри друку та згенерувати файли, які можуть бути розпізнані обладнанням для друку.

Для ефективної підготовки деталей до друку використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Це програми, що надають інструменти для редагування, оптимізації, ремонту та генерації файлів друку. Вони дозволяють виробити деталь, яка відповідає вимогам проекту, особливостям дизайну, параметрам матеріалу та особливостям обладнання виробництва.

У даному розділі розглянемо основні аспекти програмного забезпечення для підготовки деталей до друку. Розглянемо різні програми, їх функціональні можливості, інструменти, які вони надають, а також практичні поради щодо ефективного використання програмного забезпечення.

Розуміння правильності процесу підготовки деталей до друку та володіння необхідними інструментами допоможе забезпечити якість і точність виготовлених деталей, економити час та знизити процент браку в процесі друку.

Розглянемо основні аспекти програмного забезпечення для підготовки деталей до друку, які допоможуть у цьому процесі. Програми, які генерують файл у форматі G-код (машинна мова, яку може читати 3D-принтер) називаються слайсерами (англ. to slice – нарізати). Слайсер розбиває модель на шари з попередньо заданими параметрами, яким слідуватиме принтер під час формування деталі.

Програмне забезпечення для підготовки деталі до друку обирається на основі наступних критеріїв:

- доступність;
- простота використання;
- наявність модифікаторів.

Принтери за видом технологій Directed Energy Deposition (DED), Binder Jetting (BJ), Material Jetting (MJ), Powder Bed Fusion (PBF), Sheet Lamination (SL) мають власне програмне забезпечення інтегроване в архітектуру самого обладнання, оскільки кожен виробник використовує власний продукт, це обґрунтовано складністю технологічного процесу та особливостями формування деталей.

Розглянемо програмне забезпечення, яке підтримується такими видами технологій Material Extrusion (ME) та Vat Photopolymerization (VP). Початківцю дуже складно визначитися зі слайсером, адже їх існує велика кількість. У таблиці 2 приведені основні програми-слайсери.

Таблиця 2 – Слайсери для 3D-друку

Назва	Тип принтеру	Безкоштовно	Операційна система
Astroprint	FDM/FGF	+/-	Браузер, Raspberry Pi
Craftware		+	Windows, Mac, Linux
Cura		+	Windows, Mac, Linux
FormWare		-	Windows, Mac, Linux
FlashPrint		+	Windows, Mac, Linux
ideaMaker		+	Windows, Mac, Linux
Slic3r		+	Windows, Mac, Linux
SliceCrafter		+	Браузер
KISSlicer		+/-	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pie
MakerBot Print		+	Windows, Mac
Netfabb Standard		-	Windows

Продовження таблиці 1

OctoPrint		+	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pie
PrusaSlicer		+	Windows, Mac, Linux
Repetier		+	Windows, Mac, Linux
SelfCAD		–	Браузер
Simplify3D		–	Windows, Mac
Tinkering Suite		+	Windows, Mac
Z-Suite		+	Windows, Mac
ChiTuBox	SLA/DLP	+/-	Windows, Mac, Linux
Lychee Slicer		+/-	Windows, Mac, Linux

Зважаючи на великий вибір слайсерів розглянемо лише деякі з них, що активно оновлюються та мають позитивні відгуки користувачів.

4.3.1 Ultimaker Cura

Cura – це слайсер 3D-моделей із відкритим вихідним кодом для FDM 3D-принтерів (рис. 4.6). Він був створений Девідом Бремом, який пізніше працював в Ultimaker, компанії з виробництва 3D-принтерів. Розробка розміщена на GitHub.

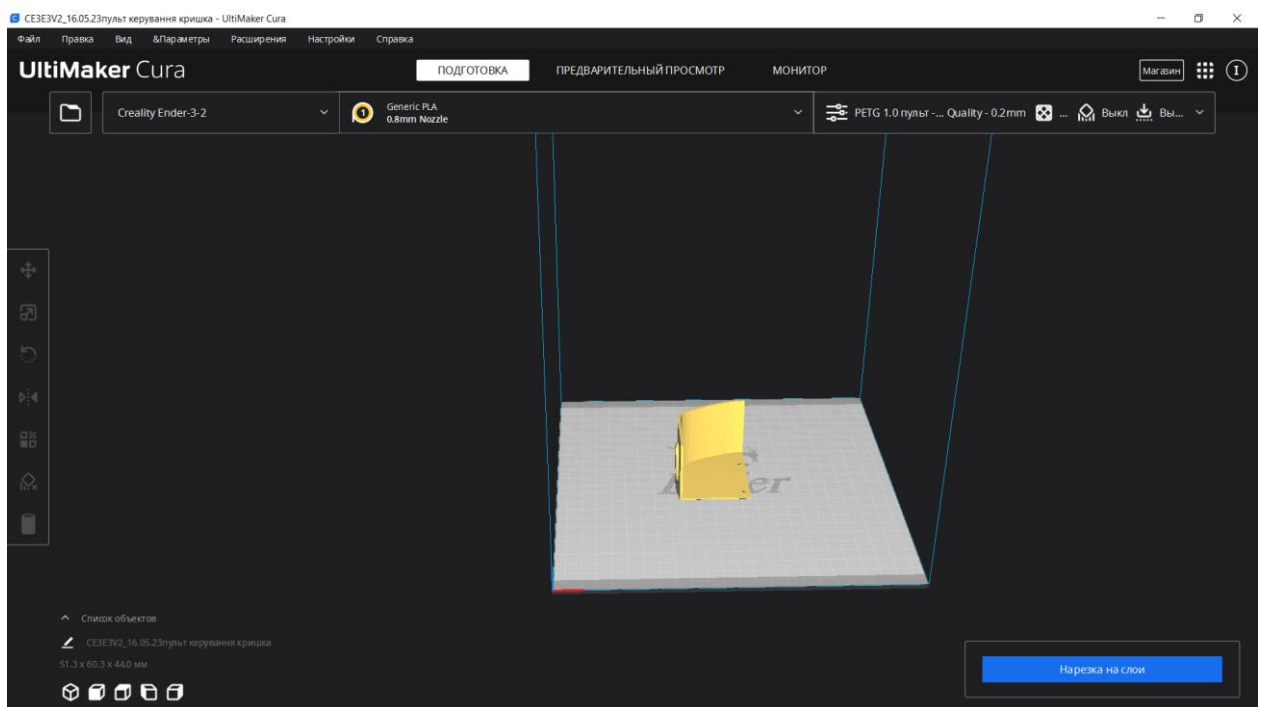


Рисунок 4.6 – Інтерфейс Ultimaker Cura

Перевагами слайсеру є те, що він підходить як для новачків, так і експертів. Як новачок, ви побачите лише найважливіші налаштування. Для експертів є понад 400 налаштувань, якими можна користуватися в експертному режимі. І з усіма цими налаштуваннями можна працювати без будь яких ускладнень, оскільки інтерфейс користувача швидкий і адаптивний.

4.3.2 Simplify3D

Слайсер Simplify3D (рис. 4.4) підтримує більшість доступних 3D-принтерів, більше того, ви можете завантажити та імпортувати більше 100 профілів 3D-принтерів, яких не знайдете в програмі за замовчуванням. Якщо вашої моделі немає в списку можливих для додавання профілів, додати профіль самостійно досить просто.

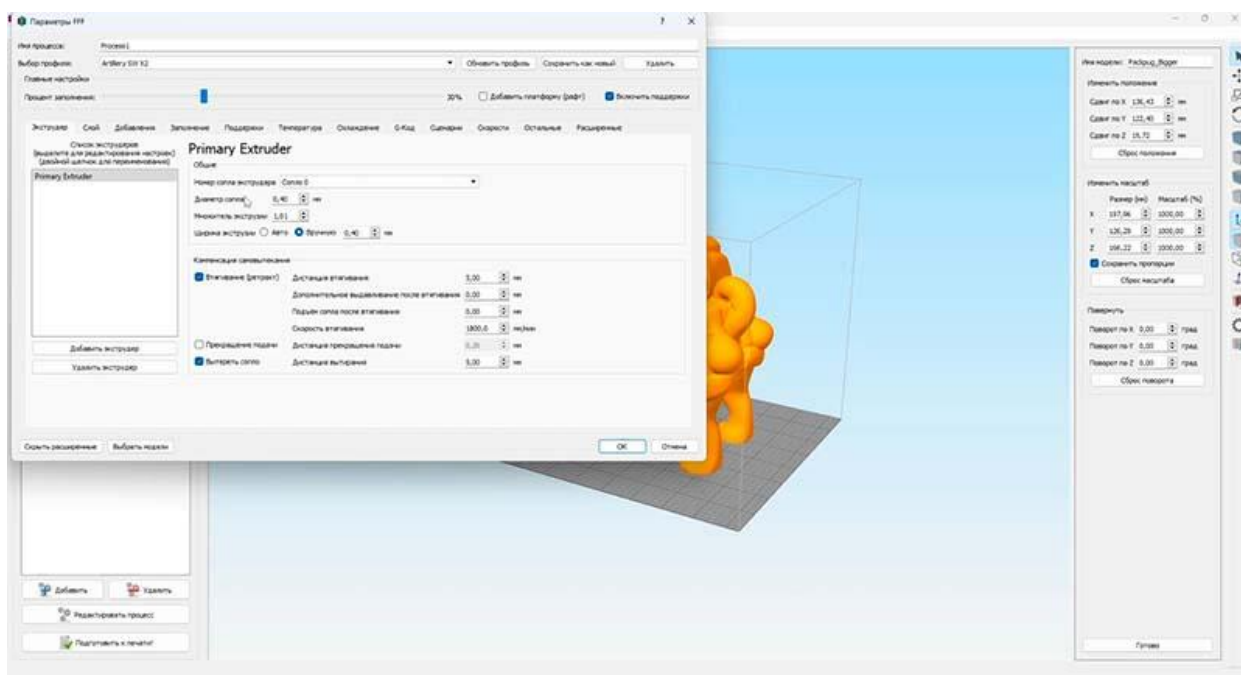


Рисунок 4.4 – Інтерфейс Simplify3D

Є безліч налаштувань, з якими ви можете експериментувати: екструдери, керування шарами, різні методи заповнення, а також налаштування температури та охолодження. Можна редагувати навіть необроблений G-код та скрипти.

Єдиний мінус – це ціна програми.

4.3.3 PrusaSlicer

PrusaSlicer (рис. 4.5) має три режими користувача і ідеально підходить для всіх: новачки бачать тільки самі базові налаштування, а досвідчені користувачі можуть налаштувати свої моделі до дрібниць. Завдяки переробленому інтерфейсу користувача PrusaSlicer простий у навігації і надає такі зручні додаткові можливості, як можливість ремонту моделей через онлайн-сервіси Netfabb, користувацькі підтримки або розрахунок час друку (особливо на власних принтерах Prusa).

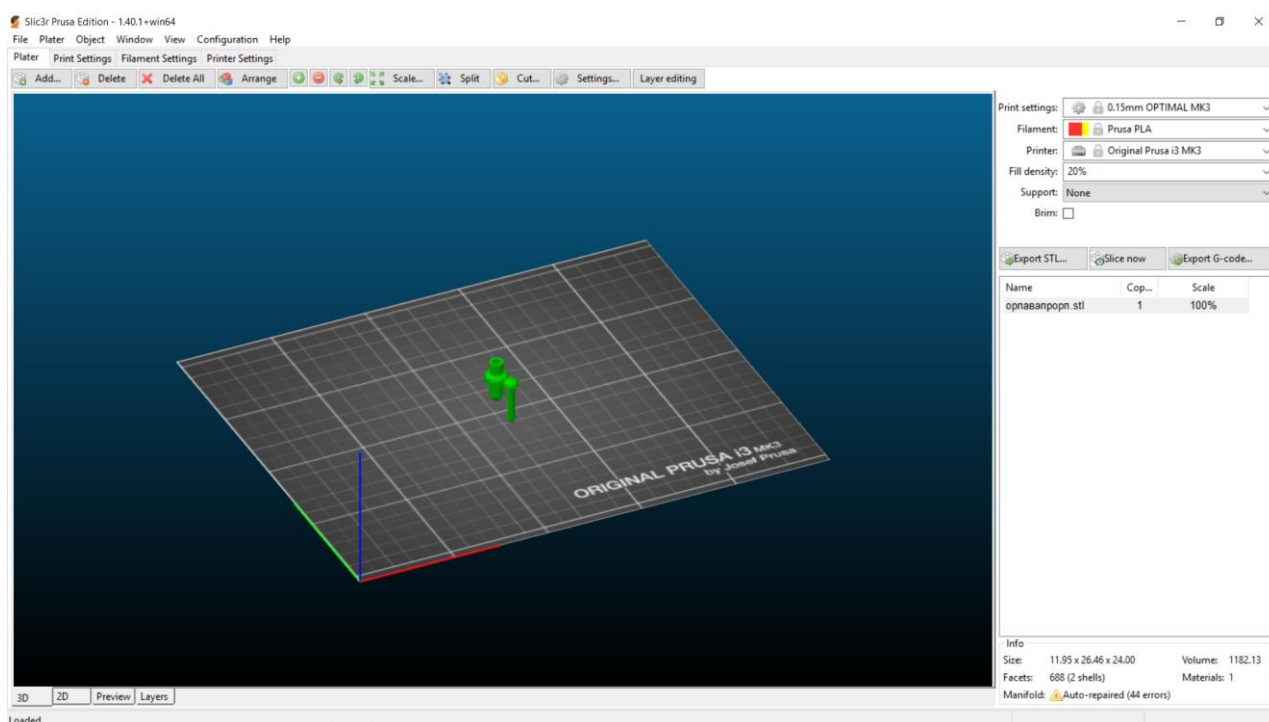


Рисунок 4.5 – Інтерфейс PrusaSlicer

PrusaSlicer також має величезну спільноту користувачів та отримує постійні оновлення та підтримку від розробників з Prusa Research. Унікальністю програми є можливість налаштовувати та доопрацьовувати для вдосконалення моделі.

4.3.4 FlashPrint

Слайсер FlashPrint (рис. 4.6) надає вам весь базовий функціонал, якщо ви новачок, а також дає можливість налаштувати деякі більш просунуті параметри.

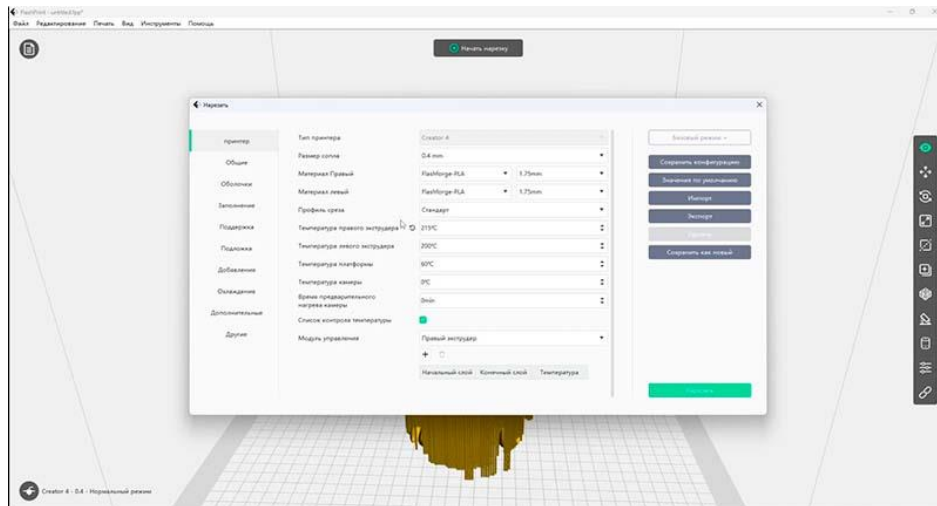


Рисунок 4.6 – Интерфейс FlashPrint

Крім функцій нарізки, FlashPrint дозволяє віддалено підключатися до принтерів через локальну мережу.

Сенсу у виділенні мінусів та плюсів немає, це брендовий слайсер призначений для конкретних пристроїв. Ви не будете використовувати його з іншими принтерами.

4.3.5 ideaMaker

Програма ideaMaker (рис. 4.7), розроблена виробником 3D-принтерів Raise3D, є програмою для нарізки, яка орієнтована на зручність і універсальність і призначена для використання з FDM 3D-принтерами Raise3D, але як і PrusaSlicer, ideaMaker сумісний з більшістю FDM 3D-принтерів.

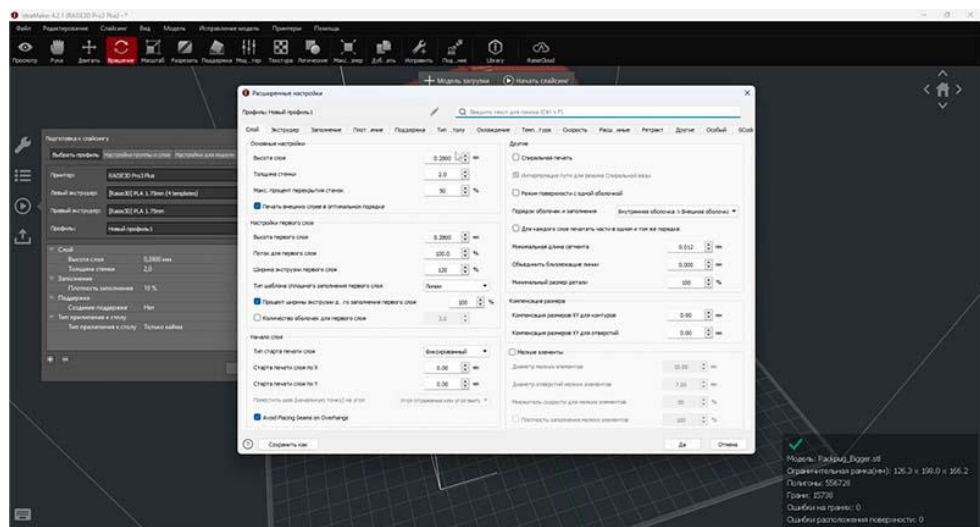


Рисунок 4.7 – Интерфейс ideaMaker

Програма працює на вбудованому компільованому багатопоточному 64-бітному механізмі нарізки, що забезпечує високу швидкість роботи.

Є ряд функцій, спрямованих на спрощення процесу нарізки, ручне та автоматичне створення підтримок, ремонт неякісних моделей та автоматична розкладка для кількох файлів в одному завданні друку.

4.3.6 ChiTuBox

Платний слайсер для фотополімерних принтерів ChiTuBox (рис. 4.8), але з можливістю пробної версії на 30 днів. Потужний інструмент навіть у пробний період.

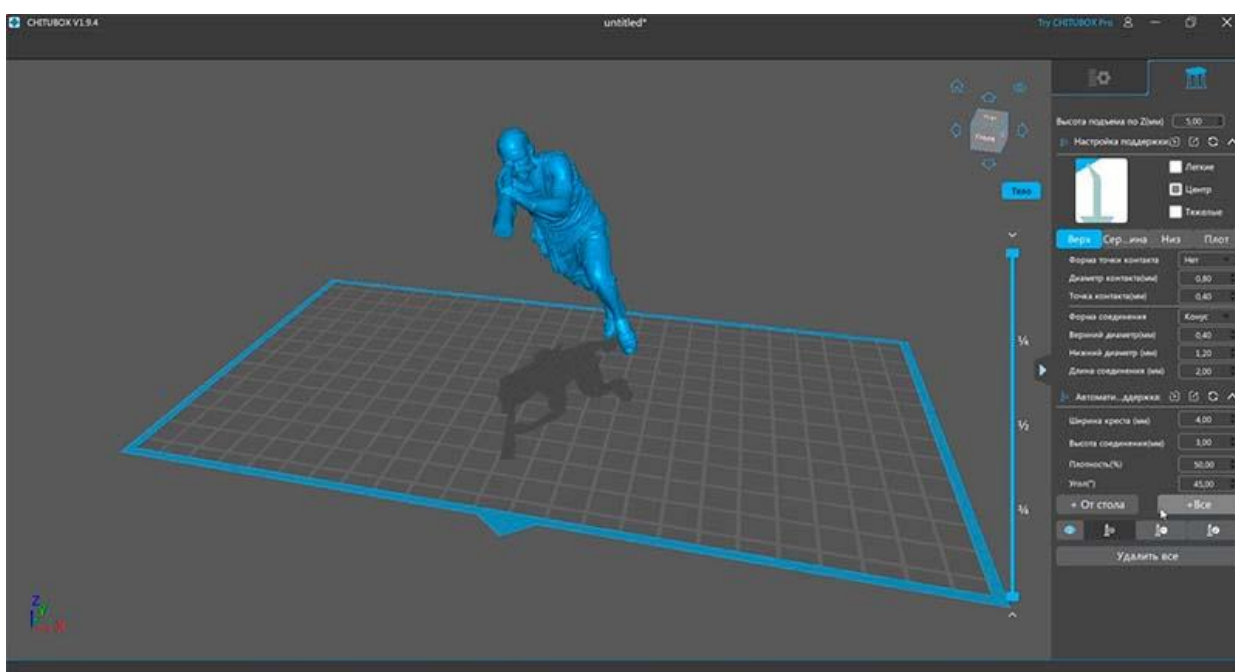


Рисунок 4.8 – Интерфейс ChiTuBox

Однією з найцікавіших особливостей слайсера є функція одночасного друку декількома екструдерами.

4.3.7 Lychee Slicer

В цілому Lychee Slicer (рис. 4.8) добре організований і є більш простим інструментом, який можна швидко запустити в роботу за допомогою кнопки Magic Mode. Magic Mode – це алгоритм оптимізації в один клік, який автоматично орієнтує, підтримує та оптимізує будь-який об'єкт, відкритий у програмі.

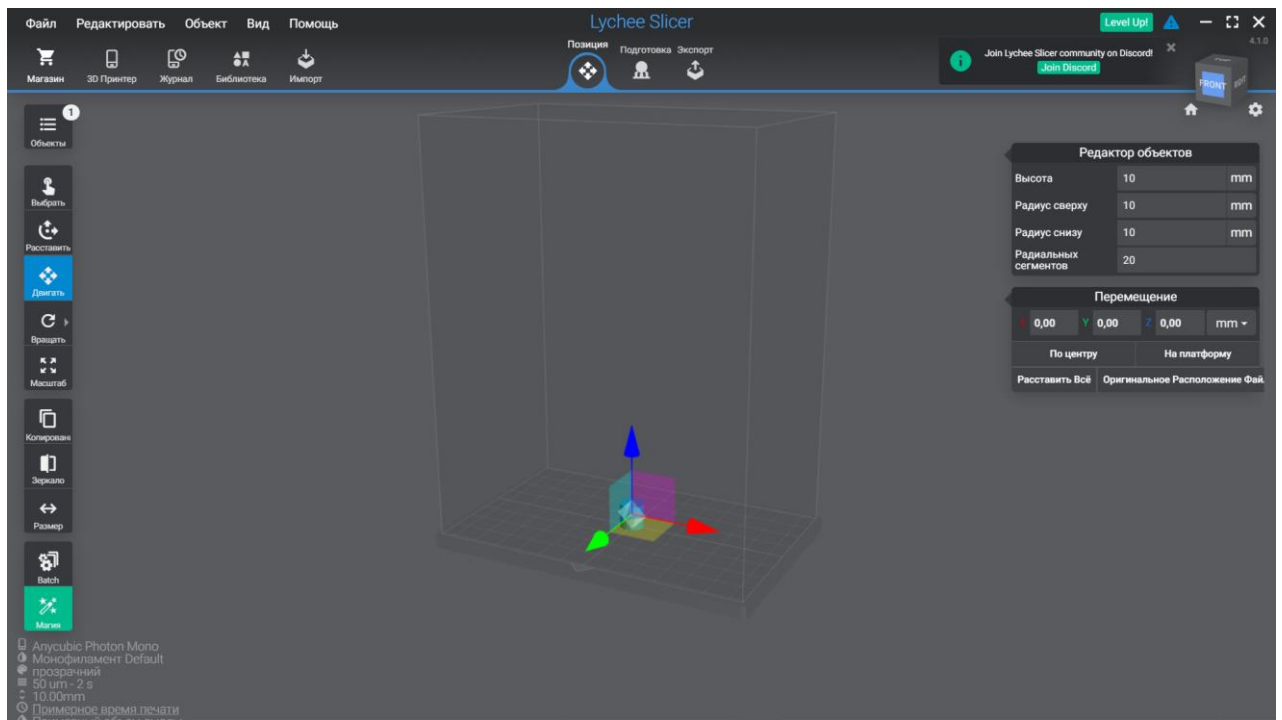


Рисунок 4.8 – Интерфейс Lychee Slicer

У Lychee Slicer також є безкоштовна і платна версія, в порівнянні з ChiTuBox безкоштовна версія Lychee Slicer надає більший функціонал.

Питання для самоконтролю

1. Яку з наведених програм слід обирати для моделювання корпусів редукторів?
2. Для яких цілей використовують програму Blender?
3. Яку програму слід обрати для навчання основам інженерного моделювання?
4. Який слайсер має найбільший спектр можливостей для підготовки моделі до друку?
5. За якими критеріями обирають програмне забезпечення для 3d друку?

РОЗДІЛ 5. Виробництво та застосування

5.1 Виробництво деталей з використанням адитивних технологій

Виробництво деталей з використанням адитивних технологій знайшло своє застосування в багатьох галузях. Вони використовуються в промисловості для виготовлення прототипів, виробництва інструментів, деталей автомобілів та літаків, медичних імплантатів, архітектурних моделей та багато іншого. Адитивне виробництво дозволяє створювати складні форми та індивідуально підходити до потреб клієнтів.

5.2 Застосування адитивних технологій у промисловості

Застосування технологій адитивного виробництва у промисловості умовно слід поділити на п'ять напрямків (рис 5.1).



Рисунок 5.1 – Основні напрямки застосування адитивних технологій у промисловості

Виготовлення прототипів. Адитивні технології забезпечують швидке та ефективно виготовлення прототипів у промисловості. Вони дозволяють швидко перетворити цифрову модель на фізичний об'єкт, що дозволяє проводити перевірку відповідності розмірів, виявляти помилки та внесення необхідних змін на ранніх стадіях розробки.

Комерційне виробництво. Адитивні технології надають можливість виготовляти деталі та вироби на замовлення з високою точністю та якістю. Промислові підприємства можуть виготовляти індивідуальні деталі для клієнтів, оптимізувати постачання та виробничі процеси, а також скоротити час, необхідний для виготовлення та доставки одиниці продукції.

Легкі та складні конструкції. Адитивні технології дозволяють створювати легкі та складні конструкції, які важко було б виготовити традиційними методами. Це відкриває нові можливості для дизайнерів та інженерів у створенні оптимальних та ефективних виробів з високою міцністю та ваговими характеристиками.

Ремонт та заміна деталей. Адитивні технології можуть бути використані для ремонту та заміни деталей у промисловості. Замість того, щоб чекати на поставку запасних частин або виготовлення нових форм, підприємства можуть швидко роздрукувати необхідні деталі на місці, зменшуючи час простою обладнання та зберігаючи продуктивність виробничого процесу.

Інновації та дизайн. Адитивні технології стимулюють інновації у промисловості, дозволяючи досліджувати нові матеріали, геометрії та дизайн. Вони надають можливість експериментувати зі структурою матеріалу, використовувати надскладну геометрію, створювати мікроструктури, що відкривають нові можливості для створення унікальних та інноваційних виробів.

Застосування адитивних технологій у промисловості модернізує спосіб виробництва, дозволяючи підприємствам бути більш гнучкими, ефективними та інноваційними. Вони відкривають нові горизонти у виробництві,

дозволяючи створювати продукцію відповідно до індивідуальних потреб клієнтів та бути конкурентоспроможними на ринку.

5.3 Застосування адитивних технологій у медицині

Однією з найважливіших областей застосування адитивних технологій стала медицина. Завдяки інноваційним можливостям, виробництво на основі 3D-друку відкриває нові перспективи у лікуванні, діагностиці та персоналізованій медицині.

Застосування технологій адитивного виробництва у медицині поділено на наступні напрямки (рис 5.2).



Рисунок 5.2 – Основні напрямки застосування адитивних технологій у медицині

Виготовлення медичних імплантатів. Адитивні технології дозволяють виготовляти медичні імплантати, такі як титанові кісткові пластини, металеві стенти, замітники суглобів та інші, які ідеально підходять

для конкретних потреб пацієнтів. Це дозволяє покращити точність та пристосованість імплантатів, зменшити час загоєння та покращити реабілітацію пацієнтів.

Виготовлення моделей для планування операцій. Завдяки адитивним технологіям стало можливим створювати тривимірні моделі органів та структур людського тіла, що дозволяє хірургам детально планувати складні операції перед їх виконанням. Це забезпечує більш точну та безпечну процедуру, допомагає уникнути ускладнень та зменшує час операції.

Виробництво медичних протезів та ортезів. Адитивні технології дозволяють виготовляти персоналізовані медичні протези та ортези для пацієнтів з вадами або втратою кінцівок. Завдяки цим технологіям можна створювати протези, які точно відповідають анатомічним особливостям пацієнта, забезпечуючи комфорт та функціональність.

Біопринтинг тканин та органів. Одним з найбільш перспективних напрямків у медичному застосуванні адитивних технологій є біопринтинг. Ця технологія дозволяє створювати штучні тканини та органи, використовуючи живі клітини та біологічні матеріали. Біопринтинг відкриває нові можливості у відновлювальній медицині та трансплантації, дозволяючи створювати на замовлення тканини та органи, які повністю сумісні з пацієнтом.

Застосування адитивних технологій у медицині відкриває нові перспективи, вони допомагають покращити якість медичної допомоги, зменшити час лікування та сприяють індивідуальному підходу до кожного пацієнта.

5.4 Застосування адитивних технологій у науці та освіті

Адитивні технології мають значний потенціал застосування в науці та освіті, їх вивчення відкриває нові можливості для дослідників, вчених та студентів, сприяючи інноваціям, творчості та навчанню.

Застосування технологій адитивного виробництва у освіті та науці поділено на наступні напрямки (рис 5.3).



Рисунок 5.3 – Основні напрямки застосування адитивних технологій у медицині

Дослідження та прототипування. Адитивні технології дозволяють швидко та ефективно виготовляти прототипи різних об'єктів, що значно спрощує процес дослідження та розробки нових продуктів. Вчені та дослідники можуть використовувати 3D-друк для створення моделей, пристроїв та прототипів, що дозволяє проводити експерименти та випробовування перед масштабуванням проектів.

Навчальні цілі. Адитивні технології мають великий потенціал у навчальних закладах. Вони надають студентам можливість навчитися процесу проектування, моделювання та виготовлення об'єктів, що сприяє розвитку творчості, просторового мислення та практичних навичок. Застосування адитивних технологій у навчанні дозволяє створювати реалістичні моделі, візуалізації та демонстрації складних процесів.

Розробка, проектування обладнання та матеріалів. Адитивні технології дозволяють використовувати різноманітні матеріали, включаючи метали, пластик, кераміку та біоматеріали. Це створює можливості для дослідження та розробки нових матеріалів з унікальними властивостями, розробку нових типів технології, удосконалення існуючих. Дослідники отримують можливість експериментувати з різними матеріалами та їхніми

комбінаціями, що сприяє розвитку наукових досліджень у матеріалознавстві та інженерії.

Застосування адитивних технологій у науці та освіті розширює можливості для інноваційного дослідження, навчання та розвитку нових ідей. Використання цих технологій у навчальних закладах та наукових лабораторіях сприяє активному залученню студентів, дослідників та вчених у творчий процес та стимулює зростання наукових досягнень.

5.5 Тенденції та майбутнє адитивного виробництва

Адитивне виробництво стало значним проривом у сфері виробництва. Однак, його потенціал тільки починає розкриватися і ми спостерігаємо низку цікавих тенденцій та перспектив для майбутнього розвитку (рис 5.4).



Рисунок 5.4 – Тенденції розвитку технологій адитивного виробництва

Тенденції та майбутнє адитивного виробництва відкривають безліч нових можливостей та потенціал для інновацій у різних галузях. З розвитком технологій, поширенням матеріалів та розширенням застосувань, ми можемо

очікувати ще більш ефективно, точно та швидко виробництво, що сприятиме розвитку промисловості та технологічному прогресу.

Питання для самоконтролю

- 1. В чому полягає перспективність використання адитивних технологій в промисловості?*
- 2. Чому найбільший темп розвитку адитивних технологій спостерігається в високотехнологічних галузях?*
- 3. Які технології друку мають перспективи в медичній галузі?*
- 4. Чи є перспективним використання керамічних матеріалів в машинобудуванні?*
- 5. Що мають на увазі під виразом розширення сировинної бази адитивного виробництва?*

Використана література

1. Diegel O., Nordin A., Motte D. Additive Manufacturing Technologies. A *Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, P. 19–39. DOI: 10.1007/978-981-13-8281-9_2.
2. Dilberoglu U. M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2017. Vol. 11. P. 545–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
3. Sanjay S., Guha P. M. Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2017. Vol. 69, No3. DOI: 10.1007/s11837-016-2231-4.
4. Beth E. Carroll, Todd A. Palmer, Allison M. Beese Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2015. Vol. 87, 1, April P. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
5. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021. Vol. 49, October P.271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
6. Perez M., Carou D., Rubio E. M., Teti R. Current advances in additive manufacturing. *13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2019. 17-19 July
7. Colosimo B. M., Qiang H., Tirthankar D., Tsung, Fugee Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. *Quality Engineering for Advanced Manufacturing*, 2018. Vol. 50, Is. 3. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
8. Singh S., Ramakrishna S., Berto F. 3D Printing of polymer composites: A short review. *MDPS*, 2020. Vol. 2, Is. 2, April. DOI: <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.
9. Rafiquzzaman Md., Maksudul Md. I., Rahman Md. H., Talukdar Md. S., Hasan Md. N. Mechanical property evaluation of glass–jute fiber reinforced polymer composites. *Polymers for advanced technologies*, 2016. Vol. 27, Is. 10, October. P. 1308–1316. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
10. Prahar M. B., Ariyan M. K., Max P., Hugh A. B., Satyandra K. G. A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2019. Vol. 27, May. P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
11. Xu X., Awad A., Robles-Martinez P., Gaisford S., Goyanes A., Basit A. W. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 2021. Vol. 329, 10 January. P. 743–757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.

12. Calvert P. Inkjet printing for materials and devices. *Chem Mater*, 2001. Oct 15;13(10). P. 3299–3305.
13. Calvert P., Crockett R. Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds. *Chem Mater*, 1997. Mar 18; 9(3). P. 650–663.
14. Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review / Medellin A. and others *J. Micro Nano-Manuf.* 2019, Sep 7(3). P. 031006. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044288>
15. Osch V. Th, Perelaer J., Laat Aw., Schubert Us. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater*, 2008. Jan 18; 20 (2). P. 343–345.
16. Sirringhaus H., Kawase T., Friend R. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 2000. Dec 15;290(5499) P. 2123–2126.
17. Shimoda T, Morii K, Seki S, Kiguchi H / Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin*, 2003. Nov, 28(11). P. 821–827.
18. Bharathan J., Yang Y. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo. *Appl Phys Lett*, 1998. May 25;72(21). P. 2660 –2662.
19. Kordás K., Mustonen T., Tóth G. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, 2006. Aug, 2(8–9). P. 1021–1025.
20. Perelaer J., Hendriks C. E., Laat A.W., Schubert U.S. One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates. *Nanotechnology*, 2009. Mar 31, 20(16). P. 165303.
21. Liu Y., Cui T., Varahramyan K. All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique. *Solid State Electron*, 2003. Sep 1;47(9). P. 1543–1548.
22. Mohsen Z., Nathan B. C. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 2019. Vol. 28, August. P.781–801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
23. Liu R., Wang Z., Sparks T., Liou F., Newkirk J. Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 2017. P. 351–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
24. Najmon J.C., Raesi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 2019. P. 7–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
25. Морі Д. Адитивне виробництво в якості фрезерування. 2014.
26. Parandoush P., Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 2017. Vol. 182, 15 December. P. 36–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
27. Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets / Okwuosa T. C. and others. *Pharmaceutical Research*, 2016. Vol. 33. P. 2704–2712.

28. Melocchi A., Parietti F., Maroni A., Foppoli A., Gazzaniga A., Zema L. Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 2016. Vol. 509, Is. 1–2, 25 July. P. 255–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.
29. Ravi A. K., Deshpande A., Hsu K. H. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016. Vol. 24, Part 1, October. P. 179–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.
30. Gong H., Snelling D., Kardel K., Carrano A. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. *JOM*, 2019. Vol. 71. P. 880–885.
31. Plott J., Tian X., Shih A. J. Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer. *Additive Manufacturing*, 2018. Vol. 22, August. P. 606–617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.
32. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, 2014. Vol. 20, Is. 3, 14 Apr. P. 192–204. DOI: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012).
33. Xin W., Man J., Zuowan Z., Jihua G., David H. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 110, 1 February. P. 442–458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
34. Kalsoom U., Nesterenko P. N., Paull B. Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Adv.*, 2016. № 6. P. 60355–60371. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.
35. Pedram P., Dong L. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 2017. Vol. 182, 15 December. P. 36–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
36. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021. Vol. 49, October. P. 271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
37. Jiaqi H., Qian C., Hao J., Bin Z., Lei L. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2020. Vol. 15, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.
38. Goh G. D., Yap Y. L., Tan H. K. J., Sing S. L., Goh G. L., Yeong W. Y. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. Vol. 45, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.

39. Gülcan O., Günaydın K., Tamer A. The State of the Art of Material Jetting – A Critical Review. *Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing II, Polymers*, 2021. Special Issue 13(16). P. 2829. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.
40. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Material Jetting *Additive Manufacturing Technologies*, 2020. P. 203–235.
41. Kunchala P., Kappagantula K. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers. *Materials & Design*, 2018. Vol. 155, 5 October. P. 443–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.
42. Dong H., Carr W. W. An experimental study of drop-on-demand drop formation. *Physics of Fluids*, 2006. 18. P. 072102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.
43. Sun S., Brandt M., Easton M. Powder bed fusion processes: An overview. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 2017. P. 55 – 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.
44. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing Technologies*. P. 125–170.
45. Awad A., Fina F., Goyanes A., Gaisford S., Basit A. W. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020. Vol. 586, 30 August. P. 119594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.
46. Chao C., Wei S.T., Jiayao C., Wei Z., Xingjian L., Tong L., Lihua Z., Kun Z. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021. Vol. 288, February. P. 116882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.
47. Santos L.M.S., Ferreira J.A.M., Jesus J.S., Costa J.M., Capela C. Fatigue behaviour of selective laser melting steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2016. Vol. 85, Part A, October. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
48. Nandy J., Sarangi H., Sahoo S. A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019. Vol. 6. P. 280–316.
49. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews*, 2016. Vol. 61, Is. 5. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
50. Mekonnen B. G., Bright G., Walker A. A. Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM). CAD/CAM, *Robotics and Factories of the Future*, P. 207–216. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME).
51. Huang J., Wang Q. Q. and J. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Advanced Digital and Other Processes, Processes*, 2020. 8(9). P. 1138. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.

52. Unkovskiy A., Schmidt F., Beuer F., Li P., Spintzyk S., Fernandez P. K. Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis. *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine*, 2021. Special Issue 10(5). P. 1070. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
53. Ono I. M. D., Abe K. Ph. D., Shiotani S. Ph. D., Hirayama Y. Ph. D. Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2000. №11(6), November. P. 527–537.
54. Hodder K. J., Chalaturnyk R. J. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. *Additive Manufacturing*, 2019. Vol. 28, August. P. 649–660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
55. Xu J., Gu X., Ding D., Pan Z., Chen K. A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 2018. Vol. 24, No. 6. P. 1012–1025. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196>.
56. Saboori A., Avers A., Marchese G., Biamino S., Lombardi M., Fino P. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Appl. Sci.*, 2019. № 9(16). P. 3316. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
57. Šljivić M., Fragassa C., Pavlović A., Krajšnik M., Ilić J., Stanojević M. Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology. *Contemporary Materials*, 2016. VII-2, Vol. 7, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
58. Kampker A., Triebs J., Kawollek S., Ayvaz P., Hohenstein S. Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*, 2019. Vol. 81, P. 815–819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>.
59. Moore J. P., Williams C. B. Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting. *Rapid prototyping journal*, 2015. Vol. 21, Issue 6, 19 Oct. P. 675–685. DOI: [10.1108/RPJ-03-2014-0031](https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0031).
60. Tyagi S., Yadav A., Deshmukh S. Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today*, 2022. Vol. 51, Part 1. P. 1012–1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
61. Jabari E., Liravi F., Davoodi E., Lin L., Toyserkani E. High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity. *Additive Manufacturing*, 2020. Vol. 35, October. P. 101330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
62. Silva M. R., Pereira A. M., Sampaio Á. M., Pontes A. J. Assessment of the Dimensional and Geometric Precision of Micro-Details Produced by Material Jetting. *Materials*, 2021. № 14(8). P. 1989. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081989>.

63. Yee L. Y., Chengcheng W., Swee L. S., Vishwesh D., Wai Y. Y., Jun W. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 2017. Vol. 50, October. P. 275–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>.
64. Willems E., Turon-Vinas M., Camargo d. S. B., Hooreweder B. V., Zhang F., Meerbeek B. V., Vleugels J. Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021. Vol. 41, Is. 10, August. P. 5292–5306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018>.
65. Song J. L., Li Y.T., Deng Q. L., Hu D. J. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. Vol. 187–188, 12 June, P. 614–618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.108>.
66. Yang L., Tang S.-y., Fan Z.-t., Jiang W.-m., Liu X.-w. Rapid casting technology based on selective laser sintering. *China Foundry*, 2021. Vol. 18. P. 296–306.
67. Morales-Planas S., Minguella-Canela J., Lluma-Fuentes J., Travieso-Rodríguez J. A., García-Granada A.-A. Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances. *Materials*, 2018. № 11(8). P. 1472. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11081472>.
68. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2020. Vol. 7. P. 338–371.
69. Demir A. G., Monguzzi L., Previtali B. Selective laser melting of pure Zn with high density for biodegradable implant manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2017. Vol. 15, May. P. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.004>.
70. Boniotti L., Beretta S., Patriarca L., Rigoni L., Foletti S. Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM. *International Journal of Fatigue*, 2019. Vol. 128, November. P. 105181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.041>.
71. Nakagawa T., Kunieda M., Liu S.-D. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference* P. 505–510.
72. Raines R., Day J. B., Salary R. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of Medical-Grade Dental Implants, Fabricated Using Vat-Photopolymerization Additive Manufacturing Process. *MSEC*, 2022. V001T07A011. 85436, 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85436>.
73. Xu X., Awad A., Robles-Martinez P., Gaisford S., Goyanes A., Basit A. W. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and

- medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 2021. Vol. 329, 10 January. P. 743–757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
74. Xu Z., Hensleigh R., Gerard N. J.R.K., Cui H., Oudich M., Chen W., Jing Y., Zheng X. (R.) Vat photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports. *Additive Manufacturing*, 2021. Vol. 47, November. P. 102321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>.
75. Sameni F., Ozkan B., Karmel S., Engstrøm D. S., Sabet E. Large Scale Vat-Photopolymerization of Investment Casting Master Patterns: The Total Solution. *Polymers*, 2022. № 14 (21). P. 4593. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214593>.
76. Gokuldoss P. K., Kolla S., Eckert J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, 2017. № 10(6). P. 672. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10060672>.
77. Small W. R., Panhuis M. Inkjet printing of transparent, electrically conducting single-walled carbon-nanotube composites. *Small*, 2007. № 3(9). Sep 3. P. 1500–1503.
78. Kim K., Zhu W., Qu X. 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle–polymer composite materials. *ACS Nano*, 2014. № 8 (10), Jul. 29. P. 9799–9806.
79. Wu J., Yuan C., Ding Z. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Sci Rep*, 2016. Apr. 13.6. P. 24224.
80. Kokkinis D., Schaffner M., Studart A. R. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nat Commun*. 2015. Oct. 23.6. P. 8643.
81. Liu W.; Du Pont, J. N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by Laser Engineered Net Shaping. *Scr. Mater*, 2003. № 48, P. 1337–1342.
82. Heer B., Bandyopadhyay A. Silica coated titanium using Laser Engineered Net Shaping for enhanced wear resistance. *Addit. Manuf*, 2018. № 23. P. 303–311.
83. Das M., Balla V. K., Kumar T. S. S., Bandyopadhyay A., Manna I. Tribological, electrochemical and in vitro biocompatibility properties of SiC reinforced composite coatings. *Mater. Des*, 2016. № 95. P. 510–517.
84. Traxel K. D., Bandyopadhyay A. Reactive-deposition based additive manufacturing of Ti-Zr-BN composites. *Addit. Manuf*, 2018. № 24. P. 353–363.
85. Li Y., Hu Y., Cong W., Zhi L., Guo, Z. Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping: Effects of deposition variables. *Ceram. Int*, 2017. № 43. P. 7768–7775.
86. Niu F., Wu D., Zhou S., Ma G. Power prediction for laser engineered net shaping of Al₂O₃ ceramic parts. *J. Eur. Ceram. Soc*, 2014. № 34. P. 3811–3817.

87. Wu D. J., Niu F. Y., Ma G. Y., Zhang B., Yan S. Process optimization for suppressing cracks in laser engineered net shaping of Al₂O₃ ceramics. *JOM*, 2016. № 69. P. 557–562.
88. Ma G., Wang J., Niu F., Sun B., Wu D. Influence of powder distribution on the Al₂O₃ thin-wall ceramic formed by laser engineered net shaping. *Chin. J. Lasers*, 2015. P. 42. P. 0103006.
89. Niu F., Wu D., Ma G., Zhang B. Additive manufacturing of ceramic structures by laser engineered net shaping. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2015. № 28. P. 1117–1122.
90. Dehoff R. R., Sarosi P. M., Collins P. C., Fraser H. L., Mills M. J. Microstructural evaluation of LENSTM deposited Nb-Ti-Si-Cr alloys. *MRS Online Proc. Libr. Arch.*, 2002. № 753. P. 2–7.
91. Fischer P., Karapatis N., Romano V., Glardon R., Weber H. P. A model for the interaction of near-infrared laser pulses with metal powders in selective laser sintering. *Appl Phys A*, 2002. № 74(4), Apr. 1. P. 467–474.
92. Prakash K. S., Nancharaih T., Rao V. S. / Additive manufacturing techniques in manufacturing an overview. *Mater Today Proc.*, 2018. Jan 1, 5(2). P. 3873–3882.
93. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *ISRN Mech Eng*, 2012. Aug, 16.
94. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: a review. *J Manuf Process*, 2017. № 25, Jan 1. P. 185–200.
95. Williams J. D., Deckard C. R. Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. *Rapid Prototyp J.*, 1998. № 4 (2). Jun 1. P. 90–100.
96. Duan B., Wang M., Zhou W. Y., Cheung W. L., Li Z. Y., Lu W. W. Three-dimensional nanocomposite scaffolds fabricated via selective laser sintering for bone tissue engineering. *Acta Biomater*, 2010. № 6 (12), Dec 1. P. 4495–4505.
97. O'Neill P., Jolivet L., Kent N. J., Brabazon D. Physical integrity of 3D printed parts for use as embossing tools. *Adv. Mater. Process. Technol.*, 2017. № 3. P. 308–317.
98. Anunmana C., Ueawitthayasuporn C., Kiattavorncharoen S., Thanasrisuebwong P. In vitro comparison of surgical implant placement accuracy using guides fabricated by three different additive technologies. *Appl. Sci.*, 2020. № 10. P. 7791.
99. Nowacki J., Sieczkiewicz N. Problems of determination of MultiJet 3D printing distortions using a 3D scanner. *Arch. Mater. Sci. Eng.*, 2020. № 103. P. 30–41.
100. Perelaer J., Hendriks C.E., Laat A.W., Schubert U.S. One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates. *Nanotechnology*, 2009. № 20 (16), Mar 31. P. 165303.
101. Kordás K., Mustonen T., Tóth G. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, 2006. № 2(8–9), Aug. P. 1021–1025.

102. Shimoda T., Morii K., Seki S., Kiguchi H. Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin.*, 2003. № 28 (11), Nov. P. 821–827.
103. Sirringhaus H., Kawase T., Friend R. H. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 2000. № 290 (5499), Dec 15. P. 2123–2126.
104. Van O. T. H., Perelaer J., Laat A. W., Schubert U. S. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater*, 2008. № 20 (2), Jan. P. 18343–345.
105. Singh M., Haverinen H. M., Dhagat P., Jabbour G. E. Inkjet printing—process and its applications. *Adv Mater*, 2010. № 22 (6), Feb. 9. P. 673–685.
106. Gans De B. J., Duineveld P. C., Schubert U. S. Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments. *Adv Mater*, 2004. № 16 (3), Feb. 3. P. 203–213.
107. Wiria F. E., Leong K. F., Chua C. K., Liu Y. Poly- ϵ -caprolactone/hydroxyapatite for tissue engineering scaffold fabrication via selective laser sintering. *Acta Biomater.* 2007, № 3(1), Jan 1. C. 1–2.
108. Guo R., Ren Z., Bi H., Xu M., Cai L. Electrical and thermal conductivity of polylactic acid (PLA)-based biocomposites by incorporation of nanographite fabricated with Fused deposition modeling. *Polymers.*, 2019. № 11(3), Mar. P. 549.
109. Caminero M. Á., Chacón J. M., García-Plaza E., Núñez P. J., Reverte J. M., Becar J. P. Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture. *Polymers*, 2019. № 11(5), May, P. 799.
110. Serra T., Planell J. A., Navarro M. High-resolution PLA-based composite scaffolds via 3-D printing technology. *Acta Biomater*, 2013. № 9 (3), Mar. 1. P. 5521–5530.
111. Lam C. X., Savalani M. M., Teoh S. H., Huttmacher D. W. Dynamics of in vitro polymer degradation of polycaprolactone-based scaffolds: accelerated versus simulated physiological conditions. *Biomed Mater*, 2008. № 3 (3), Aug 8. P. 034108.
112. Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Mater Des.*, 2016. № 102, Jul 15. P. 276–283.
113. Schwaar C. High-Performance 3D Printing Materials Guide *All3DP*, 2022.
URL: <https://all3dp.com/1/high-performance-3d-printing-materials-the-ultimate-guide/>.
114. Конструкційні інженерні пластмаси ТОВ «Сантекс». URL: <https://plastmass.kiev.ua/uk/>.
115. PTFE. URL: <https://www.hpp-performance.com/en.html>.
116. Полілактид. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Полілактид>.

117. O'Connell J. PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide. *All3DP*, 2023. URL: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>.
118. McInnes L. The Environmental Impact of Corn-Based Plastics. *SCIENTIFIC AMERICAN*, 2008. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/environmental-impact-of-corn-based-plastics/>.
119. АБС-пластик. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/АБС-пластик>.
120. Carolo L. The Best ABS Filaments of 2022. *All3DP*, 2022. URL: <https://all3dp.com/2/abs-filament-brands-compared/>].
121. Інженерні пластики PMMA, SAN, ASA, PBT, POM і інші. *Skytech Polymer*, 2018. URL: <https://skytechpolymer.com.ua/ua/inzhenernye-plastiki-pmma-san-asa-pbt-pom-i-drugie.html>.
122. PLASTIC & RESIN ASSOCIATIONS SPI WPC EPDA MAPP ARPM BACK ABOUT Acrylonitrile Copolymers Elastomer Suppliers COMPANIES ACRYLIC-STYRENE-ACRYLONITRILES (ASA). *CROW*. URL: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/ASA.html>.
123. POLYETHERIMIDES (PEI). *CROW*. URL: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEI.html>.
124. Полієфірефіркетон (ПЕЕК). *Пластик – Україна*. URL: <https://plastics.ua/industrial/ua/products/engineer/peek/>.
125. Фотополімерна смола для 3Д Принтера. *ANYCUBIC*, 2023. URL: <https://anycubic.biz/ua/fotopolimernaya-smola>.
126. Silicon nitride. *Lithoz*, 2023. URL: <https://lithoz.com/en/materials/lithanit-782/>.

ДОДАТОК А

Аналітичні данні

Таблиця 1 – Технологічні особливості методів адитивного виробництва

Вид технології	Метод виробництва	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
1	2	3	4	5
Binder Jetting	BJ	<ul style="list-style-type: none"> • довговічність деталей друку; • друк декількома матеріалами одночасно. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • необхідність вторинної обробки. 	<ul style="list-style-type: none"> • прототипування; • розробка електронних компонентів; • ливарна справа.
Directed Energy Deposition	LENS	<ul style="list-style-type: none"> • швидкість друку; • вартість матеріалів; • дуже велика область друку. 	<ul style="list-style-type: none"> • дуже великі витрати енергії; • низька роздільна здатність. 	<ul style="list-style-type: none"> • виробництво деталей високої відповідальності; • ремонт та додавання деталей.
	EBAM			
Material Extrusion	FDM	<ul style="list-style-type: none"> • низька вартість обладнання та матеріалів для друку; 	<ul style="list-style-type: none"> • обмежена точність друку; • анізотропія. 	<ul style="list-style-type: none"> • виготовлення функціональних прототипів; • виробництво деталей високої відповідальності.
		FGF	<ul style="list-style-type: none"> • відкритий вихідний код; • можливість придбати такий принтер у розібраному вигляді за низькою ціною 	

1	2	3	4	5
		або зібрати самостійно •друк декількома матеріалами одночасно.		
Material Jetting	MJ	•висока точність друку; •друк декількома матеріалами одночасно;	•висока вартість принтерів та матеріалів для друку; •крихкість друкованих деталей.	•виготовлення функціональних прототипів; •розробка електронних компонентів; •ювелірне виробництво; •промисловий і архітектурний дизайн.
	NPJ			
	DOD	•висока деталізація.	•висока вартість принтерів та матеріалів для друку; •обмежений вибір матеріалів для друку; • крихкість друкованих деталей.	•високоточне прототипування; •створення форм для подальшого лиття; •ювелірне виробництво.

1	2	3	4	5
Powder Bed Fusion	SLS	<ul style="list-style-type: none"> •друк об'єктів зі складною геометрією; •відсутність підтримок; •дуже висока міцність друкованих деталей; •високі механічні властивості зіставні з самим матеріалом. 	<ul style="list-style-type: none"> •висока вартість принтерів; •неможливість друку деяких пористілих деталей. 	<ul style="list-style-type: none"> •виготовлення функціональних прототипів; • ливарна справа; • виробництво деталей високої відповідальності.
	MJF	<ul style="list-style-type: none"> •друк об'єктів зі складною геометрією; •відсутність підтримок; •дуже висока міцність друкованих деталей; •високі механічні властивості зіставні з самим матеріалом. 	<ul style="list-style-type: none"> •шорстка поверхня; •пористість деталей без постобробки; •усадка або деформація деталей під час обробки. 	<ul style="list-style-type: none"> •виготовлення функціональних прототипів; • виробництво деталей високої відповідальності.

1	2	3	4	5
	SLM	<ul style="list-style-type: none"> •друк об'єктів зі складною геометрією; •друк пустотілих об'єктів ; •дуже висока міцність друківаних деталей; •високі механічні властивості 		
	DMLS	<ul style="list-style-type: none"> зіставні з самим матеріалом; •різноманітність доступних матеріалів; •висока роздільна здатність друківаних деталей; •безвідходне виробництво; •швидкість вища ніж у ливарного процесу; •відсутність зварних швів. 	<ul style="list-style-type: none"> •дуже висока вартість принтерів; • великі витрати енергії. 	<ul style="list-style-type: none"> •ВИГОТОВЛЕННЯ функціональних прототипів; • виробництво деталей високої відповідальності; •друк імплантів; • аерокосмічна промисловість.

1	2	3	4	5
	ЕВМ	<ul style="list-style-type: none"> • висока щільність та механічна міцність об'єктів; • друк об'єктів зі складною геометрією; • відсутність підтримок; • безвідходне виробництво; • друк у вакуумній камері. 	<ul style="list-style-type: none"> • шорстка поверхня; • дуже висока вартість принтерів; • великі витрати енергії; • низька роздільна здатність. 	
Sheet Lamination	LOM	<ul style="list-style-type: none"> • дешевий матеріал для друку; • різноманітність варіантів постобробки; • виробництво крупних моделей; 	<ul style="list-style-type: none"> • дуже повільна швидкість друку; • невисока міцність моделей; • низька роздільна здатність друку. 	<ul style="list-style-type: none"> • прототипування та створення макетів.
Vat Photopolymerization	SLA	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • друк дуже тонких шарів. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • висока вартість принтерів та матеріалів. 	

1	2	3	4	5
	DLP	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • висока швидкість друку (вище ніж SLA принтер); • наявність домашніх та промислових моделей. 	<ul style="list-style-type: none"> • крихкість друкованих деталей; • висока вартість матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> • стоматологія; • медицина; • ювелірна справа; • ливарна справа.
	CDLP	<ul style="list-style-type: none"> • висока точність друку; • висока швидкість друку (вище ніж SLA та DLP принтер); • наявність домашніх та промислових моделей. 		

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники технологій адитивного виробництва

Вид технології	Продуктивність, см ³ /год	Різноманітність матеріалу	Якість, мкм	Вартість обладнання, \$
Binder Jetting	1100 – 3120	Алюміній, бронза, кераміка, гіпс, пісок, інконель, нержавіюча сталь	50-200	від 5 тис. до 1.8 млн.
Directed Energy Deposition	430 – 1570	Сплави які зварюються, кераміка	250-5000	від 200 тис. до 5 млн.
Material Extrusion	720 – 4680	Полімери, композити, метали, біоматеріали	50-5000	від 0,2 тис. до 400 тис.
Material Jetting	900– 2530	Фотополімери, нержавіюча сталь, кераміка, віск	16-32	від 20 тис. до 600тис.
Powder Bed Fusion	30 –400	Алюміній, кераміка, кобальт, інконель, золото, полімери, титан, сплави які зварюються	30-120	від 20 тис. до 2 млн.
Sheet Lamina-tion	20 – 320	Папір, кевлар, бронза, металева фольга, листовий пластик	70-200	від 9 тис. до 37 тис.
Vat Photopolymerization	192 – 1500	Фотополімери, композити	25-100	від 3 тис. до 800 тис.

Таблиця 3 – Фізико-хімічні параметри полімерів для FDM друку

	ABS	PLA	ASA	PP	PMMA	HIPS	PC	PA	PET	PETG	TPU	PEI	PEEK
Водопоглинання (23 °C, 24 год, при зануренні), %	0.2 - 0.3	0.3 - 4	3	0	-	1	0,2	1,5	2	-	0,6	-	-
Щільність (23 °C), г/см ³	1.04	1.24	1,07	0,905	1,20	1,05	1,24	1,02	1,27	1.27	1,21	1,27	1,26
Відносне подовження при розтягуванні (23 °C), %	6 -100	3,8-4	15	13	40-58	30	6	9	50	40	510	-	3,9
Межа текучості при розтягуванні (23 °C), МПа	34 - 52	60-77	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-
Міцність при згині (23 °C), МПа	52 -95	-	47	-	-	50	95	-	70	-	-	-	-
Міцність при розтягуванні (23 °C), МПа	26 - 47	53	47	28	83	30	68	48	70	126	250	105	105
Модуль пружності при згині (23 °C), МПа	1700 - 3000	2300-2800	-	-	-	-	2410	1900	2700	2100	-	-	-
Модуль пружності при розтягуванні (23 °C), МПа	1700 - 2930	3500	2200	1150	-	2230	2300	-	3000	7800	304	3200	4100
Типова усадка, %	0.3 - 0.8	0.01 - 0.05	-	-	-	-	0.3 - 0.7	-	-	-	-	-	-
Ударна в'язкість по Шарпі (без надрізу, 23 °C), кДж/м ²	60 - не руйнується	-	18	-	-	120	-	не руйну- ється	-	не руйну- ється	-	-	66
Ударна в'язкість по Шарпі (з надрізом, 23 °C), кДж/м ²	5 - 47	5,2-7.3	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	7
Ударна в'язкість по Шарпі (з надрізом, -30 °C), кДж/м ²	3 - 26	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-