

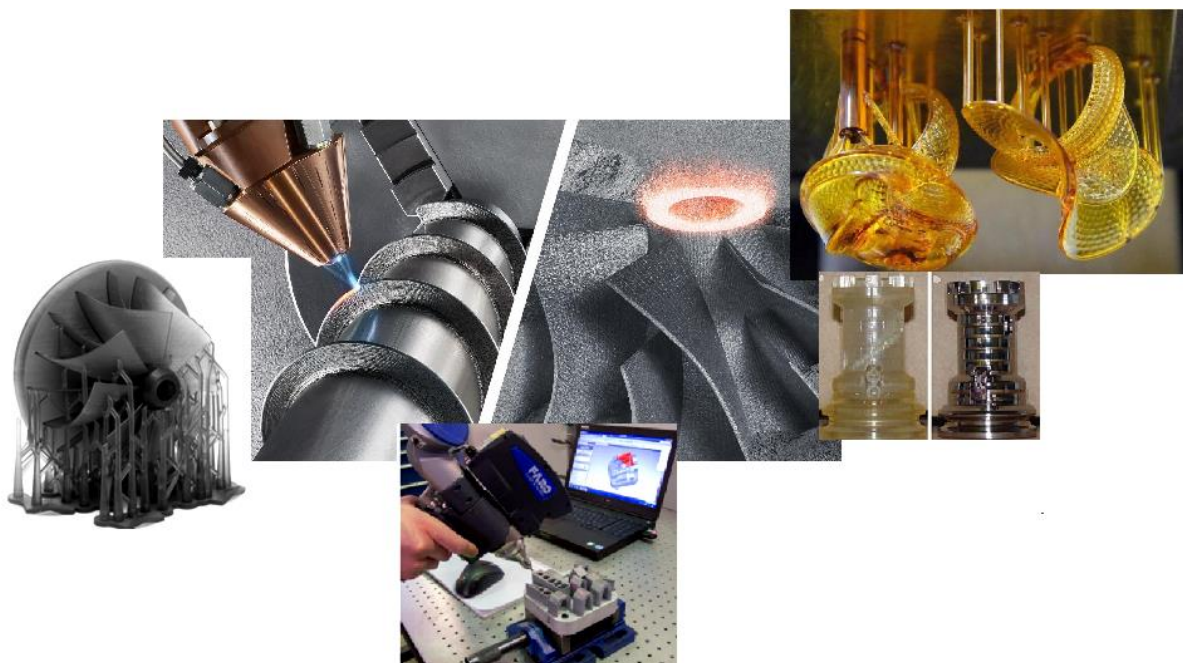
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Л. І. Пупань

ПОСТПРОЦЕСИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчальний посібник



Харків
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

Л. І. Пупань

ПОСТПРОЦЕСИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчальний посібник

для студентів
спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

УДК 621.7.01
П88

Рецензенти:

О. В. Білогуб, д-р техн. наук, проф., Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;

Е. С. Геворкян, д-р техн. наук, проф., Український державний університет
залізничного транспорту

Пупань Л. І.

П88 Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2023. – 91 с.

У посібнику розглянуто основи теоретичних та практичних аспектів постпроцесів, що використовуються у різних методах адитивного виробництва. Визначено доцільність реалізації раціональних постпроцесів з метою усунення структурних дефектів та підвищення фізико-механічних властивостей виробів адитивного виробництва. Матеріал викладено відповідно до змісту дисципліни «Постпроцеси інтегрованих генеративних технологій».

Призначений для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання.

Іл. 37. Табл. 5. Бібліогр. 60 найм.

УДК 621.7.01

© Л. І. Пупань, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	7
1.1. Сутність реалізації, вихідні матеріали та галузі використання найбільш поширених процесів адитивного виробництва	8
1.2. Основні переваги та недоліки адитивних процесів виготовлення виробів машинобудування та інших галузей.....	16
Питання для самоперевірки	17
2. ПОНЯТТЯ ПОСТПРОЦЕСІВ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	18
2.1. Актуальність постпроцесів у різних адитивних технологіях... ..	18
2.2. Класифікаційні ознаки постпроцесів адитивних технологій	20
Питання для самоперевірки	23
3. ХАРАКТЕРИСТИКА НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ ПОСТПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ .	24
3.1. Особливості поділення-дозування матеріалу як постпроцесу адитивного виробництва	24
3.2. Зміна фізико-механічних та хімічних властивостей матеріалу як постпроцес адитивного виробництва	30
3.2.1. Технологічний процес інфільтрації та його використання в селективному лазерному спіканні	30
3.2.2. Специфіка термічної та хіміко-термічної обробки як постпроцесу технології виготовлення виробів із сталей і кольорових металів та сплавів селективним лазерним спіканням	39
3.2.3. Термомеханічна обробка гарячим ізостатичним пресуванням	42
3.3. Розмірна постобробка виробів адитивного виробництва.....	46
3.3.1. Види розмірної обробки в процесах <i>SLA</i> , <i>SLS</i>	47
3.3.2. Гібридні процеси на базі поєднання адитивного виробництва заготовки та розмірної механічної обробки.....	49
3.4. Фінішна обробка виробів адитивного виробництва.....	53
3.4.1. Постпроцес абразивно-екструзійної обробки	54
3.4.2. Формування функціонально-захисних покриттів на поверхні виробів адитивного виробництва	55

	Питання для самоперевірки	65
4.	Якість виробів адитивного виробництва	67
4.1.	Основні показники якості виробів адитивного виробництва згідно з їх функціональним призначенням та експлуатаційними властивостями.....	67
4.2.	Геометрична точність виробів адитивного виробництва	70
4.3.	Методи контролю якості виробів адитивного виробництва	72
	Питання для самоперевірки.....	83
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	85

ВСТУП

Адитивні технології (АТ), або технології пошарового синтезу, є одним із найперспективніших напрямків розвитку «цифрового» виробництва. Дані технології дозволяють суттєво прискорити НДДКР, вирішити завдання підготовки виробництва, а також активно застосовуються для виробництва готової продукції у багатьох галузях, включаючи машинобудування.

Існує велика різноманітність технологій, які можна назвати адитивними. Їх поєднує створення виробу не відділенням «зайвого» матеріалу від заготовки (як у традиційних «віднімальних» технологіях), а пошаровим або локальним «нарощуванням» шляхом додавання матеріалу.

Ці технології почали розвиватися на початку 80-х років. За чотири десятиліття технологія перейшла від виробництва переважно пластикових прототипів до отримання готових функціональних виробів. Технології адитивного виробництва зробили значний ривок завдяки швидкому вдосконаленню електронної обчислювальної техніки та програмного забезпечення, розвитку лазерних технологій, можливості поєднання різних технологій в одному технологічному процесі.

Серед застосування адитивних технологій найбільш затребуваним є виробництво функціональних виробів для таких галузей промисловості, як авіакосмічна галузь, авто- та машинобудування, ВПК, медицина, тобто там, де існує гостра потреба у виготовленні високоточних складних виробів та їх прототипів у найкоротші терміни.

Актуальною сьогоденною сферою застосування адитивних технологій є відновлення у містах України зруйнованих внаслідок агресії Росії будівель, споруд, у тому числі тих, що мають історичну цінність. Приклад такого застосування АТ розробляється і харківськими фахівцями.

Поряд із безперечними перевагами даного інноваційного технологічного напрямку в даний момент існують також певні обмеження, пов'язані з недостатньою якістю отримуваних виробів згідно з існуючими високими вимогами до умов їх експлуатації та функціонального призначення. Особливо ця проблема є актуальною для процесів адитивного виробництва з використанням порошкового матеріалу як вихідного.

Вирішення цієї проблеми та значне поширення областей застосування виробів АТ можливе за рахунок використання постпроцесів обробки, які є одним з найважливіших етапів адитивного виробництва.

У навчальному посібнику надано інформацію щодо теоретичних та практичних аспектів постпроцесів, використовуваних у різних методах адитивного виробництва. Визначено доцільність використання раціональних постпроцесів з метою усунення структурних дефектів та підвищення фізико-механічних властивостей виробів адитивного виробництва.

Матеріал викладено відповідно до змісту лекцій з дисципліни «Постпроцеси інтегрованих генеративних технологій».

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Одним із сучасних та швидко поширюваних технологічних напрямків у багатьох сферах діяльності є **адитивні технології (АТ)** (*Additive Manufacturing (AM) or Additive Layer Manufacturing (ALM)*). Ринок адитивних технологій зростає щорічно на 30 % і, за свідченнями фахівців, інтенсивно розвиватиметься найближчими роками.

Адитивне виробництво (АВ) – це виготовлення деталей, яке бере за основу покрокове додавання складових на плоску або осьову основу. У найменуванні «адитивність» лежить основний принцип цього процесу. Цей варіант виготовлення ще називають вирощуванням через те, що виріб виробляється пошарово.

Образ виробу задається аналітично, кресленням, файлами комп'ютерних томографів або цифровими фотографіями. На цій основі створюється тривимірна математична модель конструкції об'єкта, яка оптимізується, а потім пошаровим нарощуванням різними способами матеріалізується, тобто створюється фізичний об'єкт (рис. 1.1).

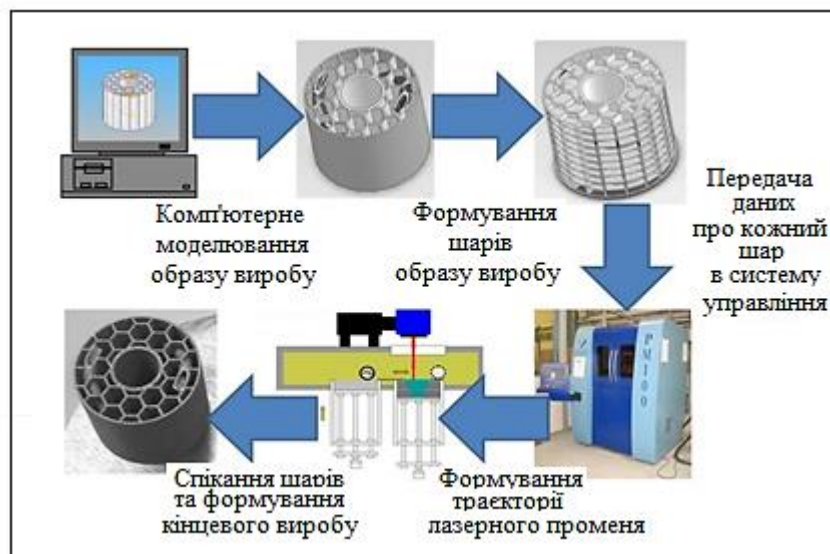


Рисунок 1.1 – Загальна схема адитивного виробництва

Ідеологія адитивного формоутворення моделі, прототипу або кінцевого виробу базується на комп'ютерному автоматизованому 3D CAD проектуванні; комп'ютерній візуалізації; комп'ютерній оптимізації конструкції об'єкта, виходячи з вимог дизайну, форми, функціональних властивостей; трансформації трикоординатної моделі у сукупність

двовимірних пошарових моделей; можливості відтворення цієї сукупності пошарових моделей, тобто матеріалізації моделі як єдиного цілого, як твердотільного фізичного виробу або його прототипу.

Застосування АТ показує стійке зростання. Розмір сучасного ринку адитивного виробництва складає близько 1,3 млрд доларів, включаючи виробництво спеціального обладнання та послуг у співвідношенні орієнтовно 1/1. Частка країн, що активно розвивають та застосовують технології адитивного виробництва, становить приблизно: США – 39,1 %, Японія – 12,2 %, Німеччина – 8,0 %, Китай – 7,7.%.

1.1. Сутність реалізації, вихідні матеріали та галузі використання найбільш поширених процесів адитивного виробництва

Незважаючи на те, що в науково-популярній літературі прийнято використовувати термін «3D-друк» як синонім всіх процесів адитивного виробництва, насправді існує безліч окремих процесів, що відрізняються методом виготовлення шарів. Окремі процеси відрізняються залежно від матеріалів та машинної технології. Група Американського товариства з випробувань та матеріалів (*ASTM*) «*ASTM F42 – Адитивне виробництво*» сформулювала набір стандартів, що класифікують низку процесів адитивного виробництва за 7 категоріями (Стандартна термінологія для технологій адитивного виробництва, 2012 р.):

- фотополімеризація (*VAT Photopolymerisation*);
- струменева подача матеріалів (*Material Jetting*);
- струменева подача зв'язуючого (*Binder Jetting*);
- екструзія матеріалів (*Material Extrusion*);
- спікання порошку (*Powder Bed Fusion*);
- ламінування листів (*Sheet Lamination*);
- пряме наплавлення (*Directed Energy Deposition*).

Коротка характеристика деяких найбільш поширених методів адитивних технологій, що відрізняються вихідним матеріалом та видом його постачання, методом фізико-хімічного впливу на матеріал на стадії матеріалізації 3D моделі наводиться далі.

- **Лазерна стереолітографія** як основний процес фотополімеризації

(*ASTM – VAT Photopolymerisation, SLA process*) базується на створенні тривимірних об'єктів пошаровою полімеризацією (затвердінням) рідких фотополімерних матеріалів при впливі на них ультрафіолетового випромінювання або випромінювання видимої частини спектра (рис. 1.2, а).

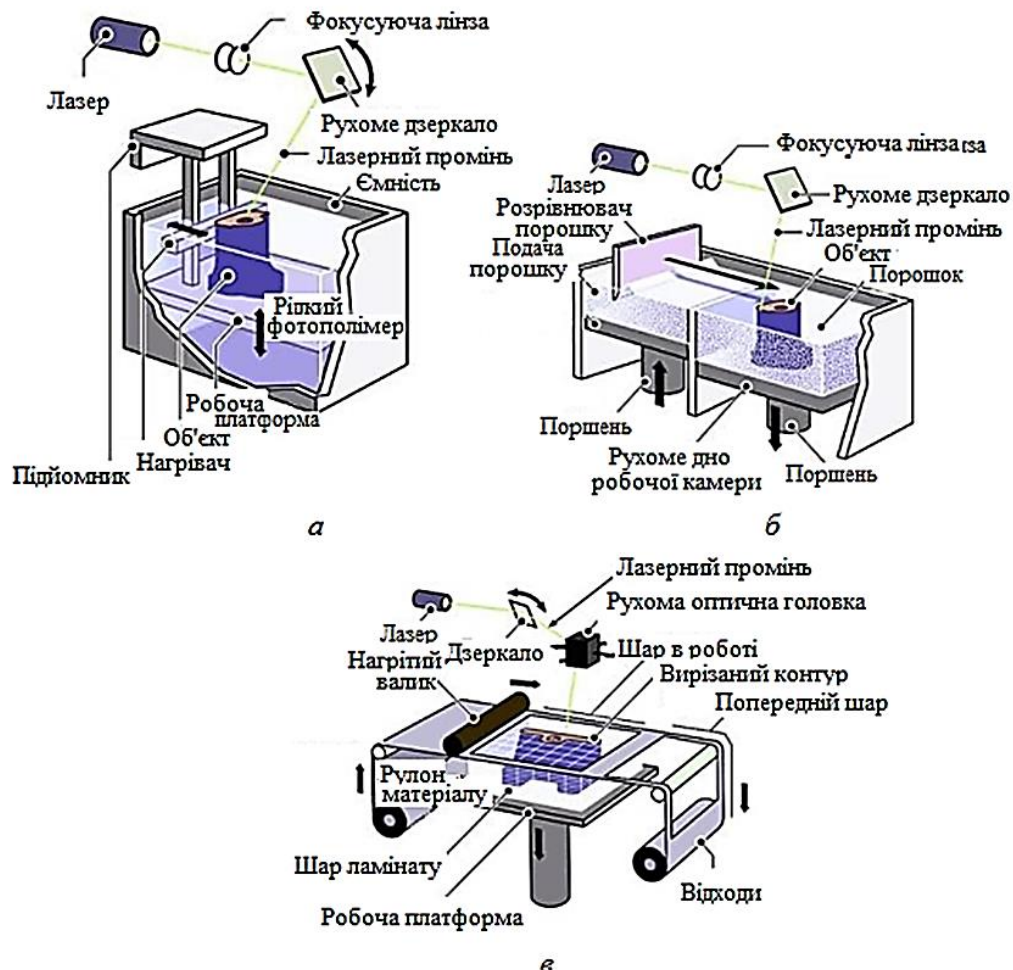


Рисунок 1.2 – Принципова схема *SLA* (а), *SLS* (б) та *LOM* (в) – установок

Основою лазерної стереолітографії є локальна зміна фазового складу однорідного середовища (перехід рідина – тверде тіло) в результаті ініційованої лазером у даному об'ємі матеріалу реакції фотополімеризації.

Як вихідні матеріали в *SLA* використовують рідкі композиції, схильні до фотополімеризації, що зазвичай є багатокомпонентними системами, які складаються з сполучної речовини, світлочутливих сполук реактопластів (переважно, складів на основі епоксидних смол), а також добавок (фотоініціаторів, наповнювачів, барвників), що забезпечують необхідні властивості як композиції, так і полімерного матеріалу, кінцевого виробу в цілому.

Фокусування лазерного променя відбувається на поверхні рідкого фотополімеру, проте з урахуванням напівпрозорості речовини лазерний промінь проникає на певну глибину h , забезпечуючи його полімеризацію.

Під дією лазерного випромінювання в рідкому реакційноздатному середовищі (фотополімерній композиції) створюються активні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які, взаємодіючи з молекулами мономеру, ініціюють зростання полімерних ланцюгів, що приводить до фазової зміни опроміненого середовища, тобто затвердіння шару. Завдяки тому, що активовані центри виникають лише в опроміненому об'ємі, досягається просторова селективність фотоініційованої полімеризації.

Процес виготовлення виробів методом стереолітографії (*SLA*) здійснюється в такий спосіб (див. рис. 1.2, *a*). Композиція, що підлягає фотополімеризації, заливається у ванну на глибину одного шару (0,025...0,20 мм на машинах різного типу). Нижче поверхні рідкого полімеру розміщується рухома платформа, здатна переміщатися у вертикальному напрямку. Через дзеркало лазерний промінь сканує шар полімеру над платформою, що приводить до затвердіння його у формі відповідного поперечного перерізу. Далі платформа опускається на глибину одного шару і процес повторюється, поки об'єкт повністю не вибудується.

Найчастіше в *SLA* використовують випромінювання лазера з довжиною хвилі у ближній та середній УФ-області спектру для забезпечення енергії впливу, необхідної для реалізації процесу полімеризації з достатньою швидкістю.

Хімічні зв'язки, що утворюються між полімеризованими шарами *SLA*-об'єкта, дозволяють отримувати щільні, водо- та повітронепроникні вироби, які є ізотропними та мають рівну міцність у всіх напрямках.

Використовуючи різні види опромінення (безперервне, імпульсне), можна отримати на поверхні полімерну плівку (площину), лінію або точку; ці елементи використовуються для формування фізичної копії тривимірних об'єктів за їхньою комп'ютерною моделлю.

Варіацією технології лазерної стереолітографії є технологія, де замість лазера використовується *DLP*-проектор (*Digital Light Processing* – цифрова обробка світла). Шар формується відразу повністю, що дозволяє прискорити процес друку.

Різноманітність властивостей робить фотополімеризовані матеріали та вироби з них по-справжньому універсальними. Фотополімерні моделі

можуть мати різний колір, бути еластичними та жорсткими, матовими та прозорими, композитними, термостійкими, біосумісними, мати багато інших характеристик та відповідати параметрам інженерних пластиків. Ці матеріали досить технологічні і можуть піддаватися різним технологіям постобробки – склеюванню, шліфуванню, фарбуванню тощо.

Області застосування *SLA*-виробів – від машинобудування, зокрема автомобілебудування, авіабудування до медичних застосувань, археології, ювелірної промисловості тощо. Переважно отримують моделі, наприклад, випалювані (газифіковані) моделі в прогресивних технологіях точного лиття, постійні моделі для лиття в піщано-глинисті форми, випробувальні аеродинамічні моделі (рис. 1.3), а також елементи ливарного оснащення та інші вироби. Можливе виробництво малих серій товарної продукції.

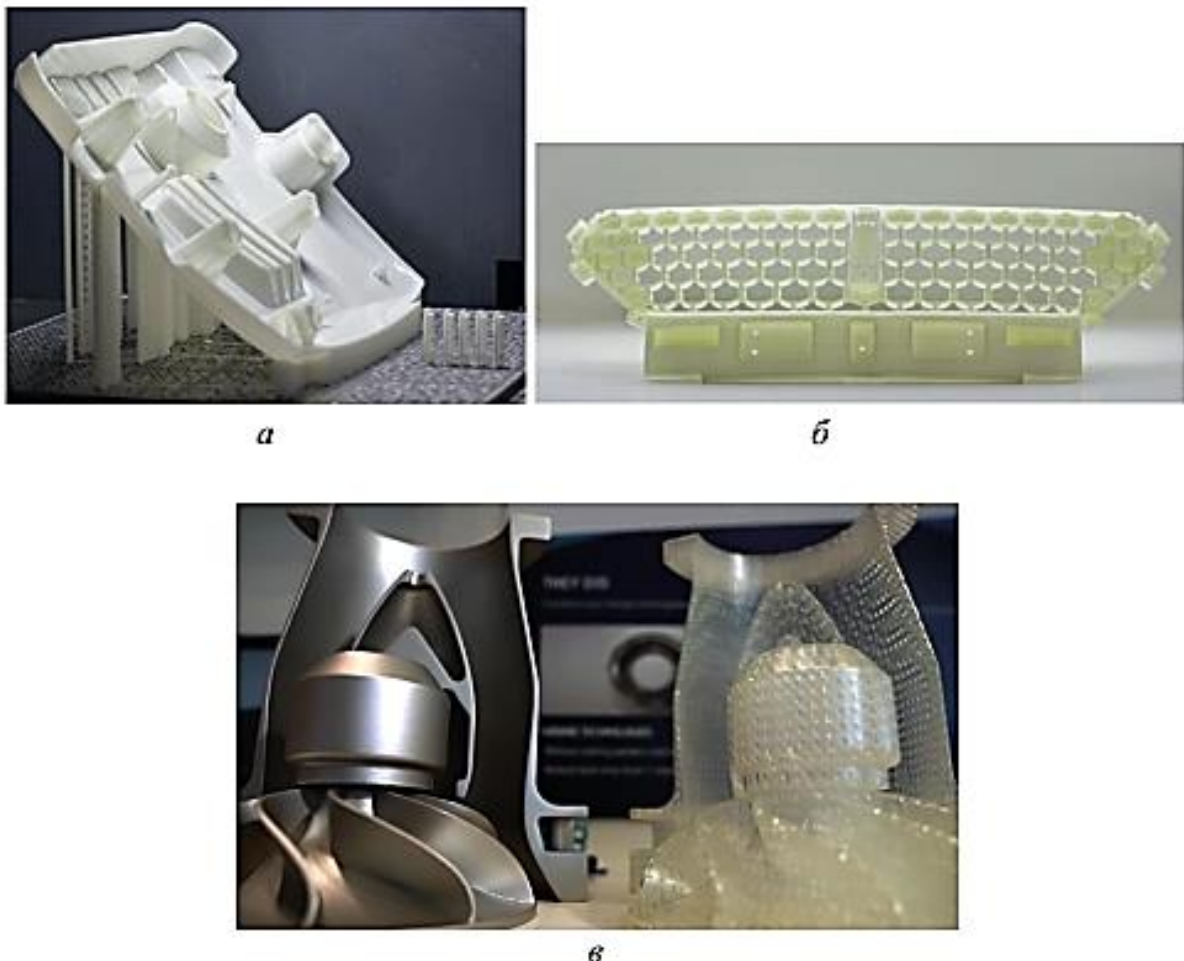


Рисунок 1.3 – Моделі авто- та авіакомпонентів, отримані *SLA*-технологією з фотополімерів та готові металеві вироби:

a – модель кришки двигуна; *б* – модель решітки радіатора;
в – готовий вузол та фотополімерна модель для авіабудування

- Однією з найперспективніших адитивних технологій є **технологія пошарового спікання** порошку (*ASTM – Powder Bed Fusion*) в результаті теплового впливу лазерного випромінювання (рис. 1.2, б).

Метод реалізується в такий спосіб. Пристрій для нанесення і вирівнювання шару порошку знімає шар порошку з живильника та рівномірно розподіляє його по поверхні підкладки (див. рис. 1.2, б). Лазерний промінь сканує поверхню даного шару порошку та шляхом спікання (оплавлення) формує виріб. Після закінчення сканування порошкового шару платформа з об'єктом опускається на товщину шару, а платформа з порошком піднімається, далі процес повторюється. Після завершення процесу платформа з виробом піднімається та очищається від невикористаного порошку.

Окрім основних переваг (можливості створення реальних повнофункціональних виробів, економічності внаслідок відсутності спеціальних підтримок під час побудови виробу) досить високі рейтинги цієї технології на ринку адитивних систем значною мірою зумовлені можливістю широкого спектру відносно дешевих, доступних та нетоксичних матеріалів у дисперсному стані – полімерів, кераміки, металів та сплавів, композитів.

Метод дозволяє швидко виготовити вироби складної форми (включаючи внутрішні порожнини) безпосередньо за комп'ютерною геометричною моделлю без використання прес-інструменту.

Ще однією привабливою стороною лазерного вибіркового спікання є можливість поєднання матеріалів та композицій, що мають різну природу хімічного зв'язку. Існує також можливість задавати градієнт властивостей за перерізом виробу в результаті зміни хімічного складу, розміру зерен та пор. Таким чином, лазерне спікання порошків є ефективною технологією у створенні функціональних градієнтних матеріалів для різних областей застосування.

Потрапляючи на тонкий шар порошку, лазерний промінь спікає його частинки та формує тверду однорідну масу відповідно до геометрії деталі. Лазерне спікання порошкових металевих і неметалічних матеріалів полягає в нагріванні локальних ділянок поверхні до температур вище критичних, що приводить до схоплювання між собою частинок порошкового матеріалу з подальшим охолодженням з високою швидкістю.

У цьому випадку (на відміну від технології *SLA*) лазерний промінь є джерелом тепла, а не джерелом світла. Як джерело тепла лазер має низку переваг: чистоту, здатність генерації високих температур, забезпечення локальності нагрівання, можливість контролю газового середовища. Це може бути використаним для захисту матеріалу від окислення і для проведення хімічних реакцій на поверхні матеріалу.

Методи лазерного адитивного виробництва, що базуються на селективному пошаровому спіканні порошкового середовища, за особливостями процесу ущільнення матеріалу умовно поділяють на такі види: **селективне лазерне спікання** (*Selective Laser Sintering – SLS*), **непряме лазерне спікання металів** (*Indirect Metal Laser Sintering – IMLS*), **пряме лазерне спікання металів** (*Direct Metal Sintering – DMLS*), а також **селективне лазерне плавлення** (*Selective Laser Melting – SLM*).

У першому варіанті ущільнення шару порошку відбувається за рахунок твердофазного спікання. У другому – за рахунок просочування сполучним матеріалом комірчастого каркасу, раніше сформованого лазерним випромінюванням. В основі прямого лазерного спікання металів лежить ущільнення за механізмом рідкофазного спікання за рахунок плавлення легкоплавкого компонента порошкової суміші. В останньому варіанті ущільнення відбувається за рахунок повного плавлення та розтікання розплаву.

Реалізація традиційного механізму твердофазного спікання (технологія *SLS*) при нагріванні порошку до температури нижче температури плавлення основного компонента не набула широкого поширення, оскільки для більш повного протікання об'ємної та поверхневої дифузії, в'язкої течії та інших процесів, що мають місце при спіканні порошку, потрібна відносно тривала витримка під дією лазерного випромінювання. Це приводить до тривалої роботи лазера та низької продуктивності процесу. Крім того, вироби, отримані *SLS*, мають пористу структуру (пористість > 20 %), що вимагає подальшої трудомісткої обробки (постообробки) для зниження пористості та поліпшення механічних параметрів.

Тому більш перспективною в цьому сенсі є технологія з використанням механізму рідкофазного спікання (*SLM*), коли нагріті лазерним випромінюванням матеріали досягають рідкої фази в процесі плавлення. При цьому відпадає необхідність застосування спеціальних

легкоплавких компонентів, можливе повне переплавлення вихідного металевого дисперсного матеріалу. Дана технологія дозволяє виготовити практично повністю щільні вироби з високими механічними властивостями завдяки дрібнокристалічній структурі.

В даний час метод *SLM* є технологією, що найбільш швидко розвивається серед методів адитивного виробництва. Висока затребуваність технології зумовлена якістю виготовлення кінцевого виробу: необхідною шорсткістю, точністю розмірів відповідальних елементів виробу, мінімальною товщиною виготовлення конструкторсько-технологічних елементів форми виробу, які можуть бути гарантовані малим радіусом лазерної плями (до 20 мкм). Обмеженням поширення *SLM* для потреб сучасної промисловості є проблема продуктивності технології.

Деякі приклади застосування технології *SLM* наведено на рис. 1.4.

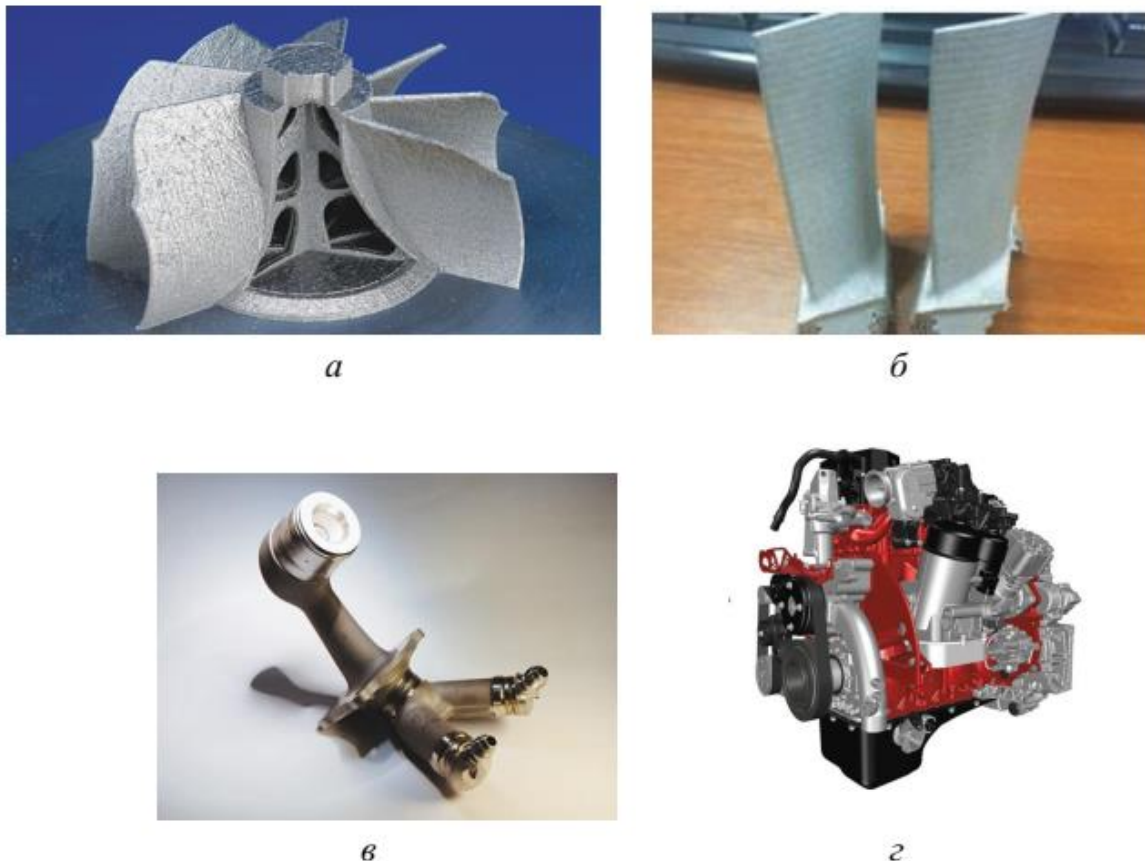


Рисунок 1.4 – Вироби авіаційної та автомобільної техніки, отримані з використанням *SLM*-технології:

a – крильчатка; *б* – лопатка турбіни; *в* – паливна форсунка;
г – двигун *Renault Trucks*

- За технологією **струменевої подачі матеріалів** (*ASTM – Material Jetting*) об'єкти створюються аналогічно двовимірному струминному принтеру. Матеріал подається у вигляді безперервного або переривчастого струменя із сопла, яке переміщається уздовж робочої платформи, де затвердіває. Модель будується шар за шаром. Оскільки матеріал повинен наноситися краплями, кількість доступних для використання матеріалів обмежена. Насамперед, це полімери та воски.

- **Моделювання методом наплавлення** (*FDM – Fused Deposition Modeling*) – це поширений процес екструзії матеріалів (*ASTM – Material Extrusion*). Матеріал протягається через сопло, де він нагрівається, а потім осідає шар за шаром. Сопло може рухатися горизонтально, а платформа переміщається вгору та вниз вертикально після нанесення кожного нового шару. Це метод, що широко використовується на багатьох недорогих побутових і аматорських 3D-принтерах. Безліч факторів впливають на кінцеву якість моделі, але процес має великий потенціал та життєздатність, коли ці фактори контролюються. Шари матеріалу можуть бути з'єднані за допомогою температурного контролю або хімічних реагентів.

- Досить поширеною адитивною технологією (також на базі використання лазерного випромінювання) є **технологія виготовлення об'єктів з використанням ламінування** (*ASTM – Sheet Lamination*). Процеси ламінування включають ультразвукове адитивне виробництво (*UAM*) та виробництво ламінованих об'єктів (*Laminated Object Manufacturing – LOM*).

У процесі ультразвукового адитивного виробництва *UAM* використовуються листи чи стрічки металу, які з'єднуються за допомогою ультразвукового зварювання. Виробництво ламінованих об'єктів *LOM*, рис. 1.2, в – пошаровий синтез виробів з листових матеріалів під впливом сфокусованого лазерного променя, тобто лазерне різання та склеювання листових матеріалів. У деяких процесах *LOM*-технології реалізується лазерне зварювання.

Вихідними матеріалами є термоклейкий папір, пластикова плівка, склотканина, кераміка, листові металеві матеріали та інші. Технологія *LOM* використовується для виготовлення моделей (наприклад, для лиття в піщано-глинисті форми, лиття за випалюваними моделями), порожнистих форм для отримання моделей, штампів, прес-форм та інших виробів.

Технологія пошарового складання з плоских шарів знайшла використання в галузі ландшафтного моделювання та створення геопросторових моделей ділянок земної поверхні, а також створення макетів у галузі архітектури та дизайну.

1.2. Основні переваги та недоліки адитивних процесів виготовлення виробів машинобудування та інших галузей

Безперечними перевагами адитивних технологій порівняно з традиційними технологіями, що застосовуються для отримання виробів машинобудування та інших галузей, є такі:

- можливість створення виробів із геометрично складною, топологічно оптимізованою конфігурацією;
- отримання необхідних експлуатаційних характеристик виробів, забезпечення їхньої багатофункціональності;
- можливість локального контролю геометрії (мікроструктури) виробів;
- отримання виробів із мінімізованою масою;
- можливість об'єднання складальних одиниць у виріб у єдиному технологічному циклі;
- економія всіх видів ресурсів;
- безвідходність;
- автоматизація процесів тощо.

У той самий час до недоліків деяких методів адитивного виробництва можна віднести такі:

- обмежене коло матеріалів, що використовуються;
- переважно дрібносерійне виробництво;
- висока собівартість виробництва виробів;
- невисока якість поверхні (передусім, це стосується шорсткості);
- недостатньо високі показники одержуваних фізико-механічних властивостей виробів.

Оптимізація параметрів процесів адитивних технологій певною мірою забезпечує вирішення чи зниження актуальності низки зазначених проблем. Тим не менш, у більшості випадків для підвищення якості, надання

необхідних функціональних властивостей з метою ефективного застосування в різних сферах діяльності отримувані вироби піддаються подальшій обробці – постобробці, яка має бути одним з основних етапів адитивного виробництва, рис. 1.5.

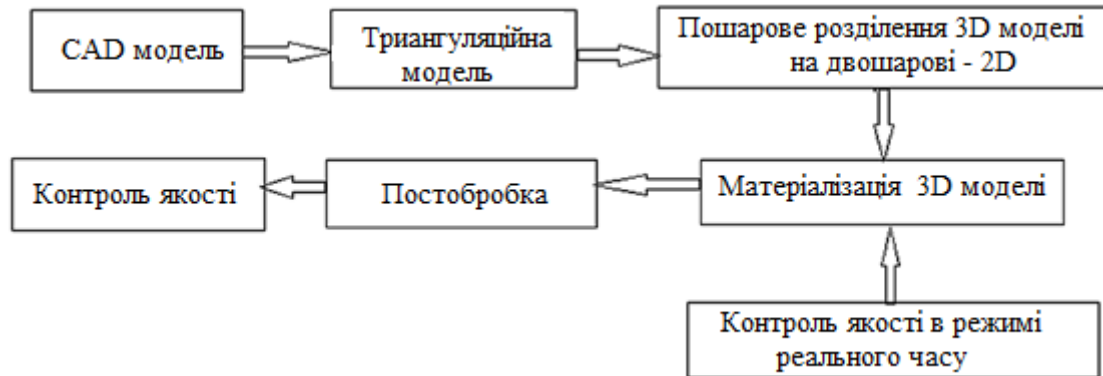


Рисунок 1.5 – Структура робочого процесу адитивного виробництва

Питання для самоперевірки

1. В чому полягає сутність адитивного виробництва?
2. З яких етапів складається загальна схема адитивного виробництва?
3. Назвіть основні процеси адитивного виробництва.
4. Вкажіть основні характеристики процесу лазерної стереолітографії: сутність реалізації, вихідні матеріали, галузі використання.
5. Дайте характеристику процесу пошарового спікання порошку та його різновидів.
6. Як здійснюються технології струменевої подачі матеріалів? Які матеріали використовуються як вихідні та які галузі використання має цей процес?
7. Охарактеризуйте технологію моделювання методом наплавлення.
8. Які особливості технології виробництва ламінованих об'єктів?
9. Назвіть основні переваги та недоліки адитивного виробництва порівняно з традиційними технологіями виготовлення виробів машинобудування та інших галузей.
10. Які варіанти вирішення основних проблем адитивного виробництва?

2. ПОНЯТТЯ ПОСТПРОЦЕСІВ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Під *постобробкою* (*post-processing*) адитивного виробництва розуміють комплекс операцій багатокрокового процесу з обробки виробу для надання йому необхідних властивостей.

Постобробка є однією з останніх та найбільш відповідальних стадій отримання кінцевих виробів (див. рис. 1.5). Вона призначена для покращення якості поверхні, підвищення геометричної точності, зниження «ефекту сходів», характерного для АВ, підвищення механічних, експлуатаційних, естетичних та багатьох інших властивостей виробів.

Існує досить велика кількість методів постобробки, які використовуються для покращення властивостей виробів адитивного виробництва. Дані методи можуть бути застосовані як окремо, так і у вигляді послідовного або паралельного їх поєднання.

Постпроцеси є дуже актуальними для практики АВ.

При цьому постобробка є одним із малодосліджених етапів у загальній схемі реалізації процесів адитивного виробництва. Відповідна нормативна база поетапних методів постобробки різних технологій АВ знаходиться на стадії формування. Це багато в чому зумовлено різними фізичними принципами формування виробів (насамперед одного з найбільш відповідальних етапів – етапу матеріалізації 3D моделей), а також специфічними особливостями вимог до конкретних продуктів пошарового вирощування залежно від сфери застосування та галузі промисловості.

2.1. Актуальність постпроцесів у різних адитивних технологіях

Порівняно з іншими адитивними технологіями, дещо меншою є актуальність постпроцесів для технології стереолітографії (*SLA*).

Досить високі показники якості поверхні, фізико-механічних властивостей, однорідність та ізотропність структури виробів, одержаних *SLA*, обумовлені особливостями реалізації даної технології.

Поєднання наявності резервуара з нагрітим реактопластом і замкнутого простору, в якому ведеться друк, забезпечує ідентичні умови для рівномірного затвердіння в кожній точці, що сприяє однорідності структури

та властивостей. Висока точність визначається нижчою температурою друку порівняно з технологіями, які використовують термопластичні полімери, в яких відбувається оплавлення або розплавлення вихідного матеріалу (*SLS*, *SLM*).

У зв'язку з тим, що при формуванні об'єкта *SLA* реалізується світлова, а не теплова дія лазерного випромінювання, процес друку відбувається практично при кімнатній температурі. В результаті об'єкти, що формуються, не мають артефактів, пов'язаних з тепловим розширенням і стисканням (тобто деформацією виробів).

Зазвичай до технологій постпроцесів у *SLA* відносять операції вилучення виробу, видалення залишків вихідної речовини (промиванням у спеціальному розчині), сушіння виробу (з продуванням повітря для прискорення процесу) та механічне відділення всіх підтримуючих структур, після чого поверхня піддається очищенню. Далі слідує доотвердження об'єктів з функціонального пластику в ультрафіолетовій камері для завершення процесу полімеризації та стабілізації механічних властивостей.

Як постпроцес може бути проведена операція з'єднання склеюванням для застосування одержуваних виробів у збірних конструкціях.

Шліфування, полірування, герметизація та/або фарбування виробу призначені для покращення його естетичності та довговічності.

Проблеми забезпечення якості вирощуваних виробів і, відповідно, необхідність постобробки в технології *SLS* (*SLM*) більш актуальні, що пов'язано з наступними факторами:

- наявністю пористості;
- досить високими значеннями шорсткості поверхні та видимою шаруватістю одержуваних виробів;
- неповним видаленням полімеру та наявністю його залишків в об'ємі виробу при використанні композитних вихідних складів (наприклад, суміші металу з полімером або металевих порошоків, покритих полімерним шаром) і т. д.

Вирішення цих проблем здійснюється реалізацією процесів постобробки, які можуть бути аналогічні традиційній фінішній обробці виробів, отриманих методом порошкової металургії. Деякі їх види оригінальні та пов'язані з особливостями структури та властивостей вихідних дисперсних середовищ, а також процесів, що використовуються

для реалізації технології селективного лазерного спікання (сплавлення) та можливими дефектами структури кінцевих виробів.

2.2. Класифікаційні ознаки постпроцесів адитивних технологій

У зв'язку з великою різноманітністю видів постпроцесів існує кілька підходів до їхньої класифікації.

Наприклад, до класифікаційних ознак належать наступні: фізико-хімічна сутність постпроцесів, принцип реалізації (розмірна, безрозмірна обробка), вид вихідного матеріалу, метод адитивного виробництва, призначення одержуваних об'єктів тощо.

Серед великої різноманітності варіантів систематики постпроцесів, запропонованих різними авторами, особливий інтерес представляє *класифікація за призначенням* (за результатами застосування, табл. 2.1), а також *відповідно до класифікації робочих процесів виготовлення деталей за цільовим призначенням* (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Процеси постобробки за призначенням

Призначення постобробки	Процеси
Видалення матеріалу підтримки	Механічні процеси; електроерозійне оброблення; розчинення; застосування комбінованих технологій
Поліпшення структури поверхні	Дробеструминна обробка; шліфування; полірування з попереднім забарвленням (наприклад, ціаноакрилатом) або застосуванням герметика; гідроабразивна обробка
Поліпшення точності виробу	Автоматичні стратегії управління у реальному часі для моніторингу та контролю процесу; інтеграція адитивних технологій та традиційної «віднімальної» обробки (наприклад, фрезерування); компенсація усадки у масштабуванні CAD-моделі; попередня обробка STL-файлу для компенсації похибок з подальшою фінішною обробкою; розробка комплексної стратегії фінішної обробки, що включає аналіз та облік похибок на всіх етапах технологічного процесу виготовлення

Продовження табл. 2.1

Естетичні покращення	Всі процеси, що застосовуються для покращення структури поверхні; оздоблювальна обробка вибраних поверхонь; фарбування з метою надання необхідної кольорової гами для забезпечення естетичних та маркетингових функцій виробу; хромування (крім естетичного поліпшення, зміцнює виріб та покращує його зносостійкість)
Підготовка до використання як модель	Специфічні процеси, що забезпечують необхідні функціональні властивості виробів для застосування в конкретних сферах виробництва як моделі, наприклад, в технології лиття за виплавлюваними моделями – облік мінімалізації зольного залишку. При використанні порошкових полістирольних моделей для лиття застосування технології інфільтрації воском для зменшення пористості та підвищення міцності і т. д.
Поліпшення властивостей з використанням нетеплових методів	Інфільтрація виробів АВ для надання особливих функціональних властивостей – збільшення міцності, пластичності, опору займистості, екранування електромагнітних перешкод тощо; застосування армування нанокомпозитами; доотвердження фотополімерних виробів у ультрафіолетових камерах; низькотемпературна термообробка
Поліпшення властивостей з використанням теплових методів	Традиційні та спеціальні методи термічної обробки при формуванні оптимальної мікроструктури та/або зняття залишкових напружень; інфільтрація за підвищених температур; гаряче ізостатичне пресування і т. д.

Систематика методів постобробки відповідно до *класифікації робочих процесів виготовлення деталей за цільовим призначенням* враховує наступні аспекти. В основі виконання робочих процесів обробки деталей у традиційних (віднімальних) технологіях лежить використання наступних фізико-хімічних явищ: оплавлення, пластичної деформації, крихкого та пластичного руйнування, дифузії, адгезії, розчинення, фазових перетворень, хімічних та електрофізико-хімічних реакцій, а також їх поєднання та інтеграції. Відповідно до спільності багатьох явищ фізико-хімічної природи, характерних для традиційних методів різання (основного традиційного методу виготовлення деталей), а також для методів отримання кінцевих виробів в адитивному виробництві, різноманіття процесів постобробки можна уявити таким чином (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 –Класифікація методів постобробки адитивного виробництва відповідно до робочих процесів виготовлення виробів за цільовим призначенням

№ п/п	Робочий процес виготовлення виробів за цільовим призначенням	Методи постобробки
1	Поділення-дозування матеріалу	Видалення матеріалу підтримуючих структур за допомогою механічних процесів, електроерозійної обробки, розчинення, застосування комбінованих технологій
2	Зміна фізико-механічних та хімічних властивостей	Інфільтрація; термічна, хіміко-термічна, термомеханічна обробка
3	Розмірна обробка	Точіння, фрезерування, шліфування; гібридні процеси
4	Фінішна обробка поверхні	Піскоструйна обробка; полірування; абразивно-екструзійна обробка; нанесення покриттів
5	Контроль точності та якості виробів	Вимірювання геометричних параметрів виробів із використанням координатно-вимірювальних систем, систем лазерного сканування; вимірювання шорсткості поверхні за допомогою профілометрів високої роздільної здатності; визначення структурних параметрів поверхневого шару методами оптичної та електронної мікроскопії; контроль геометричних параметрів виробів, дефектів структури в об'ємі виробів методом рентгенівської комп'ютерної томографії; моніторинг за допомогою методу інфрачервоної термографії

Вибір виду постпроцесу вимагає комплексного підходу в цілому до технологічного ланцюжка виробництва виробу для досягнення його оптимальних властивостей і залежить від цілого ряду факторів, що відносяться до наявних ресурсів, технічних і технологічних можливостей, кінцевих цілей. Зокрема, мають бути враховані такі фактори:

- метод адитивної технології;
- застосований матеріал та його властивості;
- вид використовуваної установки та її техніко-економічні характеристики;
- ступінь складності виробу;

- вимоги до якості виробу залежно від його подальшого застосування;
- продуктивність процесу та його вартість;
- екологічні аспекти, зокрема, можливість утилізації виробів.

Одним із найважливіших критеріїв вибору постпроцесу адитивного виробництва є вимоги до якості кінцевого продукту. Дані вимоги визначають основні завдання, які мають бути вирішені за допомогою постобробки, наприклад:

- підвищення розмірної точності;
- зменшення шорсткості;
- забезпечення необхідних механічних властивостей поверхневого шару та об'єму виробу – твердості, характеристик міцності, у тому числі втомної міцності;
- створення сприятливого розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі та в об'ємі виробу;
- підвищення корозійної стійкості;
- надання виробу естетичного вигляду тощо.

Більш детальний розгляд зазначених класифікаційних методів постобробки адитивного виробництва відповідно до робочих процесів виготовлення виробів за цільовим призначенням розглядається в наступних підрозділах.

Питання для самоперевірки

1. В чому полягає сутність постпроцесів адитивного виробництва?
2. Які задачі вирішує застосування постобробки в АВ?
3. Надайте порівняльну характеристику актуальності постпроцесів у різних методах адитивного виробництва.
4. Які класифікаційні ознаки постпроцесів АВ Вам відомі?
5. Назвіть основні види постпроцесів залежно від призначення (результатів застосування).
6. Назвіть основні види постпроцесів відповідно до класифікації робочих процесів виготовлення деталей за цільовим призначенням.
7. Які фактори мають бути враховані при визначенні оптимального процесу постобробки?
8. Які параметри якості враховуються при визначенні доцільного процесу постобробки?

3. ХАРАКТЕРИСТИКА НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ ПОСТПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

3.1. Особливості поділення-дозування матеріалу як постпроцесу адитивного виробництва

Поділення-дозування матеріалу стосовно виготовлення деталей у традиційних технологіях – цільовий робочий процес, в результаті здійснення якого від деякої маси матеріалу відокремлюється об'єм, відповідний об'єму необхідної деталі з урахуванням необхідного припуску під подальшу обробку.

Дозування матеріалів здійснюється, наприклад, шляхом розподілу прокату на мірні заготовки, зважуванням порошків, розливанням рідкого матеріалу в ємності певного об'єму і т. д.

Процеси поділення виконуються шляхом пластичного або крихкого руйнування матеріалів (рубка за допомогою ножів на пресах і гільютинах, поділення гладкими обертовими дисками і т. д.), видаленням матеріалу із зони поділення різанням, оплавленням і хімічним розчиненням (різання пилами, ножівковими полотнами, різцями, абразивними кругами, газовим полум'ям, плазмовим струменем, анодно-механічним способом тощо).

В адитивному виробництві до цільового процесу поділення-дозування відносять відокремлення компонентів від несучої конструкції та будівельної плити (платформи); видалення допоміжних конструкцій – підтримок (підтримуючих структур, технологічних опор), призначених для досягнення та забезпечення різних рівнів геометричної складності виробів відповідно до їх конструкції.

Опори необхідні для побудови фрагментів моделі, що не торкаються нижчих шарів або робочої платформи. Самі опори не є частиною заданого виробу і після завершення процесу мають бути видалені (рис. 3.1).

Методи адитивного виробництва, пов'язані з отриманням виробів із полімерних порошкових, а також листових матеріалів, мають так звані *природні підтримки*, де побудований об'єкт укладений у надлишковий основний матеріал. Підтримки цього виду є невід'ємною частиною процесу. Основним недоліком природніх підтримок є те, що розробка конструкції виробу повинна враховувати видалення надлишку матеріалу. Наприклад,

для порожнистих виробів має бути передбачений вихідний отвір. Надлишковий матеріал може рециркулювати з необхідним ступенем фільтрації.



Рисунок 3.1 – Приклади підтримуючих структур

Штучні підтримки необхідні для методів, що не мають природньої опори (*SLA*), або для методів, пов'язаних із існуванням значного температурного градієнта, появою напружень у виробі як невід'ємної складової процесу, наприклад, у деяких виробках з металевих порошкових матеріалів (*SLS, SLM*).

В якості матеріалу підтримки може виступати як робочий матеріал, яким ведеться друк деталі, так і відмінний від нього.

Видалення технологічних підтримуючих структур є першим етапом постобробки для багатьох технологій адитивного виробництва, досить трудомістким і відповідальним, що істотно впливає на якість поверхні.

Відповідно до методу видалення розрізняють *руйнівні підтримки* (виконуються з матеріалу, що застосовується для основного виробу, або з допоміжного матеріалу, як правило, менш міцного, ніж основний матеріал), а також *виплавлювані, розчинні, порошкові підтримки*.

Найбільш трудомістким є **видалення руйнівних підтримок механічним методом** (рис. 3.2). Видалення відбувається вручну; з використанням фрезерних, стрічкових, відрізних пилок; із застосуванням електроерозійної обробки дротяним електродом та інших методів. Постпроцес механічного видалення підтримок, безумовно, позначається на якості поверхні виробів (насамперед, на шорсткості) і вимагає, зазвичай, застосування наступного етапу постобробки, наприклад, шліфування, полірування тощо.



а б
Рисунок 3.2 – Механічне видалення матеріалу підтримки:
а – FDM-виріб; б – SLA-виріб

Виплавлені підтримуючі матеріали плавляться при невисоких температурах – $60\div 100$ °С. Це спрощує їх видалення – після закінчення друку деталь обдувається нагрітим повітрям або нагрівається в печі, внаслідок чого підтримка плавиться та видаляється практично без пошкодження основи. Застосування легкоплавкої підтримки відкриває можливість виготовлення складних моделей з безлічі дрібних деталей та компонентів. Легкоплавка підтримка застосовується у методах *SLS*, *SLM*, *FDM*, *MJM* тощо.

Розчинні склади здатні розчинятися у звичайній воді чи спеціальних хімічних розчинах. До таких складів відносять, наприклад, водорозчинний *PVA*-пластик (синтетичний полімер на основі полівінілового спирту), що підтримує гелієві матеріали. Для видалення підтримки готовий виріб занурюється в агресивне для матеріалу підтримки середовище з витримкою

від 30 до 120 хв. Ця методика використовується у технологіях *SLA*, *SLS*, *FDM*, *MJM* і т. д. Для підвищення ефективності процесу видалення підтримок можуть додатково використовуватися струменевий та ультразвуковий вібраційний вплив.

Порошкова (природня) підтримка використовується не так часто, як зазначені вище типи, в основному, в технології селективного лазерного спікання *SLS*. У цьому випадку порошок виступає каркасом майбутнього виробу і твердне у відповідній формі під впливом лазерного випромінювання. Після закінчення *3D* друку деталь витягується з порошкового середовища, а залишки складу використовуються для повторного використання, що дозволяє знизити витрати на процес виробництва.

При видаленні природніх порошкових підтримок, як правило, вся збірка (отриманий виріб та розсипний порошок) знімається з машини як блок і транспортується в розділову установку, де вироби видаляються вручну з навколишнього середовища порошкоподібного матеріалу за допомогою спеціальних щіток, стиснутого повітря (пневматичними пістолетами). дробоструминної обробки (з використанням сферичних частинок дробу з матеріалів із низькою твердістю). Для обробки внутрішніх порожнин і отворів додатково використовують спеціальні інструменти, пасти. Ця постобробка досить складна та трудомістка.

Розроблено також автоматизовані процеси видалення сипких порошоків, що виконуються за допомогою автономних або вбудованих у робочу камеру пристроїв (рис. 3.3).

Допоміжні конструкції можна вважати «необхідним злом» у процесі адитивного виробництва. Чим більше опорних конструкцій і вища їх складність, тим більші витрати матеріалів, енерго- та трудовитрати на подальшу обробку, тим нижча якість поверхні виробу.

З іншого боку, опорні конструкції необхідні для утримання виробу на будівельній платформі, підвищення його жорсткості та запобігання мимовільній деформації, короблення або руйнування під дією сили тяжіння, для досягнення необхідної геометрії виробу та оптимізації процесу пошарового друку, а також зменшення температурного градієнта при

вирощуванні виробів (дисипації тепла), зниження ймовірності розвитку залишкових напружень та спотворень форми.

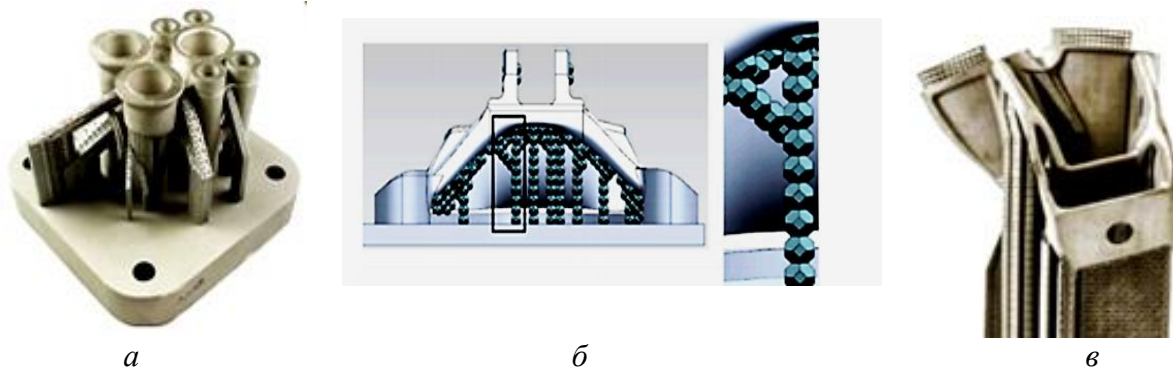


Рисунок 3.3 – Автоматизоване видалення природніх порошкових підтримок з використанням вібраційно-вакуумних пристроїв

Основними напрямками зниження трудомісткості процесу видалення підтримок є такі: оптимальна орієнтація виробу, оптимізація структури та розташування підтримок, застосування матеріалу підтримок, що легко видаляється, і т. д.

Наприклад, ефективним розташуванням підтримок є похилі та масштабовані підтримки (зі зменшенням площі в локальних ділянках, де потрібна подальша обробка і немає потреби у міцному зв'язку з платформою). Оптимізація форми підтримуючих структур може бути реалізована застосуванням рельєфної (дрібнозубчастої), блокової, фрагментованої форми, а також ґратчастих, стільникових, деревоподібних, мостових структур (рис. 3.4).

Перспективним напрямом у розвитку постпроцесів цієї групи є також автоматизація генерації опорних конструкцій із застосуванням відповідного програмного забезпечення.



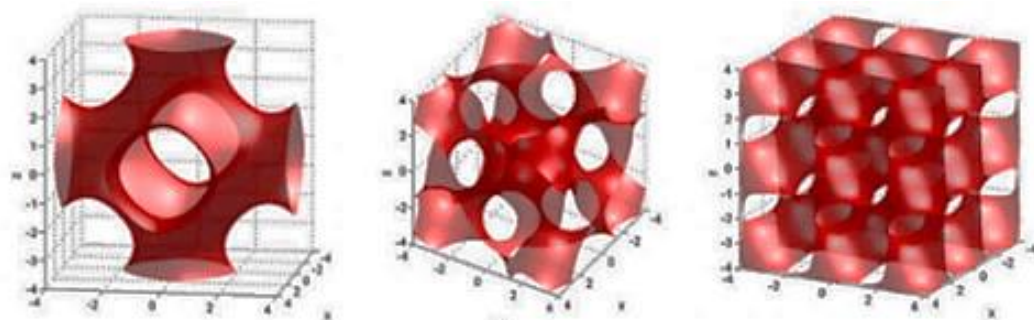
a

б

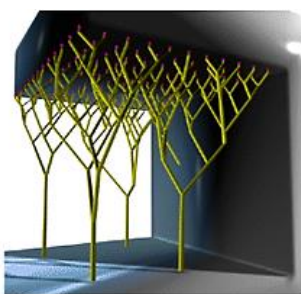
в



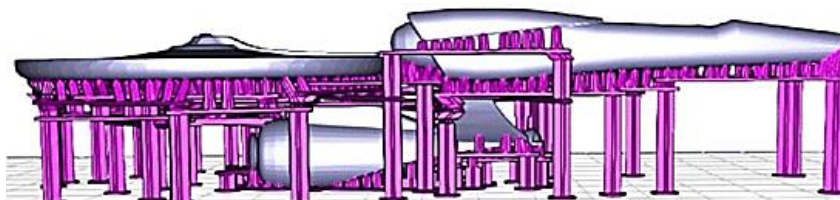
г



д



е



ж

Рисунок 3.4 – Оптимізація структури технологічних підтримок з метою зменшення обсягу постобробки:

a – похилі підтримки; *б* - блокові підтримуючі структури;
в – блокові структури із однакових елементарних одиниць;
г - ґратчасті підтримки; *д* - комірчасті структури; *е* – деревоподібні підтримки;
ж – мостоподібні опори

3.2 Зміна фізико-механічних та хімічних властивостей матеріалу як постпроцес адитивного виробництва

Зміна фізико-механічних та хімічних властивостей – цільовий робочий процес, в результаті здійснення якого весь оброблюваний матеріал заготовки або лише її поверхневі шари набувають заданих фізичних, механічних та хімічних властивостей (щільності, твердості, міцності, стійкості до хімічного впливу тощо).

Характерно, що при цьому в ряді випадків відбувається зміна розмірів та форми оброблюваної заготовки, що викликає необхідність подальшої обробки.

Основними технологіями, які цілеспрямовано змінюють фізико-механічні та хімічні властивості матеріалів виробів адитивного виробництва, є такі: інфільтрація, термічна та хіміко-термічна обробка, термомеханічна обробка, у тому числі гаряче ізостатичне пресування, та багато інших.

3.2.1. Технологічний процес інфільтрації та його використання в селективному лазерному спіканні

Технологічний процес *інфільтрації* широко використовується як метод постобробки виробів адитивного виробництва, зокрема в методі селективного лазерного спікання для зменшення технологічної пористості отримуваних виробів і підвищення їх функціональності.

Інфільтрація здійснюється поза основною установкою (в печі). Вона заснована на проникненні речовин-інфільтратів, що мають нижчу температуру плавлення порівняно з основним матеріалом, у пори виробу за рахунок капілярного ефекту, що істотно підвищує щільність.

Технологія застосовується для виробів, отриманих спіканням металевих (у тому числі, плакованих), неметалічних порошків, композиційних складів.

Особливості реалізації процесу інфільтрації в процесах адитивних технологій (наприклад, *SLS*, *SLM*) багато в чому аналогічні подібній операції, що традиційно застосовується в технології порошкової металургії для зменшення пористості виробів.

Сутність методу інфільтрації полягає в тому, що з порошку більш тугоплавкого компонента формують комірчастий каркас, а потім пори заповнюють розплавленим легкоплавким компонентом (металом або сплавом).

Для покращення інфільтрації до порошку тугоплавкого компонента перед формуванням додають невелику кількість (2,5÷5,0%) порошку інфільтрата або будь-якої іншої легкоплавкої речовини.

Теорія процесу інфільтрації аналогічна до рідкофазного спікання. Капілярні сили утворюють тиск на розплав:

$$\Delta P = \frac{4\sigma_p \cos \theta}{r_{\pi}}, \quad (3.1)$$

де σ_p – поверхнева енергія розплаву; θ – кут змочування; r_{π} – радіус порових каналів.

Внаслідок заповнення пор розплавом вільна енергія системи має зменшуватися. Термодинамічні умови інфільтрації можна виразити таким чином:

$$\sigma_p \cos \theta > 0. \quad (3.2)$$

Оскільки $\sigma_p > 0$, основною умовою здійснення інфільтрації є $\theta < 90^\circ$. При $\theta > 90^\circ$ інфільтрація не реалізується. Наприклад, пористе тіло з оксиду алюмінію неможливо просочити такими рідкими металами, як мідь, нікель або залізо.

Ущільнення порошкового тіла при інфільтрації подібне до спікання в присутності рідкої фази. Швидкість інфільтрації становить $\sim 0,1 \div 1$ мм/с. Висота (товщина) інфільтрованого шару h залежить від властивостей розплаву та тривалості його контакту з твердим каркасом:

$$h = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_p \cos \theta r_{\pi} \tau}{\eta_p} \right)^{0,5}, \quad (3.3)$$

де η_p – в'язкість розплаву; τ – тривалість інфільтрації.

Тривалість повної інфільтрації τ_{π} порошкової заготовки можна визначити за формулою:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{4\eta_{\text{р}}h^2}{(r_{\text{п}} \sigma_{\text{р}} \cos \theta \pm g V \rho_{\text{р}} r_{\text{п}}^2)S} \quad (3.4)$$

де g – прискорення вільного падіння; V – початковий об'єм пор у формовці; $\rho_{\text{р}}$ – щільність розплаву; S – площа перерізу формовки.

Найбільш важливими параметрами, що визначають ефективність процесу інфільтрації для зменшення пористості, підвищення щільності та міцності виробів, є співвідношення температур плавлення основного матеріалу та інфільтрату, поверхнева енергія та в'язкість розплаву, кут змочування, час інфільтрації тощо.

Інфільтрацію здійснюють методами накладання або занурення.

У методі накладання пористий каркас з порошку тугоплавкого компонента разом з необхідною кількістю твердої легкоплавкої речовини, використовуваної як інфільтрат, поміщають у нагрівальний пристрій із захисною атмосферою (або вакуумом) і нагрівають до необхідної температури (на $100 \div 150$ °C вище за температуру плавлення інфільтрату). Об'єм легкоплавкого компонента розраховують виходячи з об'єму пор каркаса. Розплав, що утворюється, за рахунок капілярного ефекту вбирається порами каркаса.

За способом занурення пористий каркас опускають у попередньо розплавлений легкоплавкий матеріал інфільтрату. Після інфільтрації отримуваний композиційний матеріал практично не містить пор і легко піддається подальшій обробці. Для сплавів на основі заліза як інфільтрат рекомендується мідь з добавками нікелю, марганцю, алюмінію, вуглецю, цинку.

У SLS-технології пористість є одним із суттєвих недоліків процесу, що негативно впливає на фізико-механічні властивості виробів. Наявність пористості обумовлена головним чином особливостями реалізації процесу селективного лазерного спікання порошкових середовищ. Зокрема, перегрупування твердих частинок обмежене тривалістю впливу лазера та часом існування рідкої фази. Як наслідок, вироби, отримані SLS, мають комірчасту структуру (пористість може бути більше 20 %) та знижені механічні властивості.

Зниження пористості може бути досягнуто зменшенням зернистості порошкового матеріалу, навіть до нанодіапазону ($1 \div 100$ нм), проте в більшості випадків SLS-вироби піддаються інфільтрації, яка є

найважливішим етапом постобробки виробів, одержуваних пошаровим виросуванням з вихідних дисперсних середовищ.

Як інфільтрати виробів з металевих матеріалів, отримуваних лазерним селективним спіканням, застосовують сплави на основі заліза, нікелю, міді, титану, кобальту і т. д. Вибір інфільтруючого матеріалу здійснюється на основі принципів, викладених вище.

Матеріал для просочення повинен характеризуватись повною відсутністю або незначною міжфазною взаємодією з основним матеріалом виробу, малим крайовим кутом змочування та мати температуру плавлення нижче за матеріал основи. Якщо компоненти взаємодіють між собою, то в процесі інфільтрації може відбуватися утворення тугоплавких сполук або твердих розчинів, що негативно впливає на властивості та точність розмірів виробу.

Наприклад, для просочення металевого каркасу виробів із сталі, отримуваних селективним лазерним спіканням, які широко застосовують у різних сферах, використовують мідь ($T_{\text{пл}} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$) або бронзу ($T_{\text{пл}} = 930\div 1140 \text{ }^\circ\text{C}$). Для інфільтрації нікель-бронзового сплаву, який також має різні галузі застосування, може бути використаний сплав на основі олова Sn60PbAg ($T_{\text{пл}} = 189 \text{ }^\circ\text{C}$) і т. д.

Етап інфільтрації *SLS* може слідувати безпосередньо за процесом селективного спікання лазерного виробу або після послідовно реалізованих процесів лазерного спікання і видалення сполучної речовини (у разі використання плакованих порошків) (рис. 3.5, 3.6).

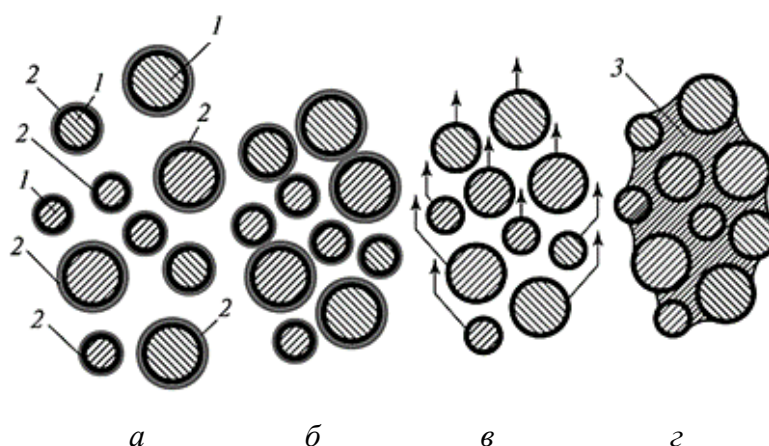


Рисунок 3.5 – Отримання виробів із композицій сталь-бронза з постпроцесом інфільтрації:

a – формування шару; *б* – пошаровий синтез; *в* – видалення сполучної речовини; *г* – інфільтрація; 1 – метал; 2 – сполучна речовина; 3 – інфільтрат

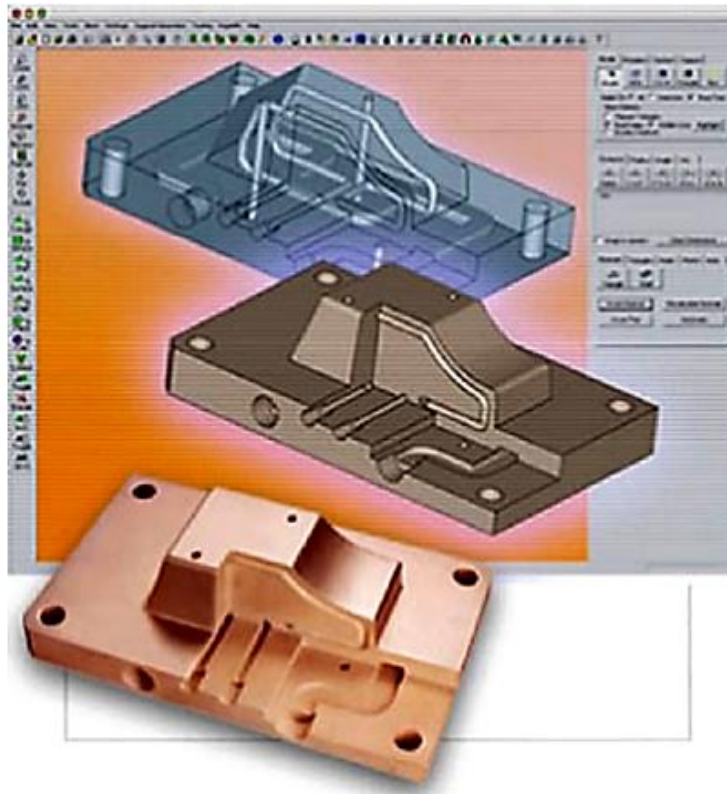
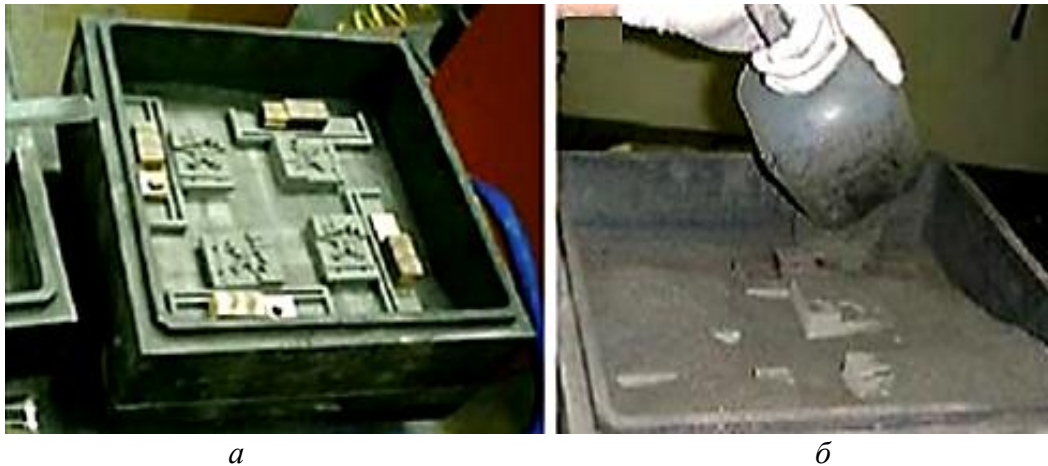


Рисунок 3.6 – 3D модель та кінцевий виріб оснасткового елемента для лиття під тиском із внутрішніми каналами охолодження після інфільтрації бронзою

Зазвичай інфільтрацію металевих виробів, отриманих *SLS*, реалізують шляхом накладання. Наприклад, при інфільтрації бронзою виробів, отриманих із сталевого або нікелевого порошку, по периферії виробів встик розміщують живильники, на яких встановлюють бронзові бруски. У печі бронза розплавляється і через живильник за рахунок капілярного ефекту проникає у тіло виробу. Матеріал кінцевого виробу є конгломератом сталі (або нікелевого сплаву) і бронзи (60 % і 40 % відповідно). Зазвичай просочення виробів проводять у засипці з оксиду алюмінію, яка відіграє роль підтримуючого каркаса (рис. 3.7). Захист від окислення здійснюється за рахунок створення в печі інертного або відновного середовища.

В результаті інфільтрації спечених *SLS*-об'єктів отримують кінцеві композитні деталі, що складаються з матричного сплаву та інфільтрату, мають значно меншу пористість (рис. 3.8), досить високі показники якості поверхні – наприклад, шорсткості ($R_a = 5 \div 10$ мкм).



3.7 – Інфільтрація порошкових виробів із сталі:

a – деталі зі сталі розміщені поряд із «човнами», в яких знаходиться бронзовий інфільтрат;

б – оточення виробів оксидом алюмінію для зміцнення та мінімізації температурного градієнта

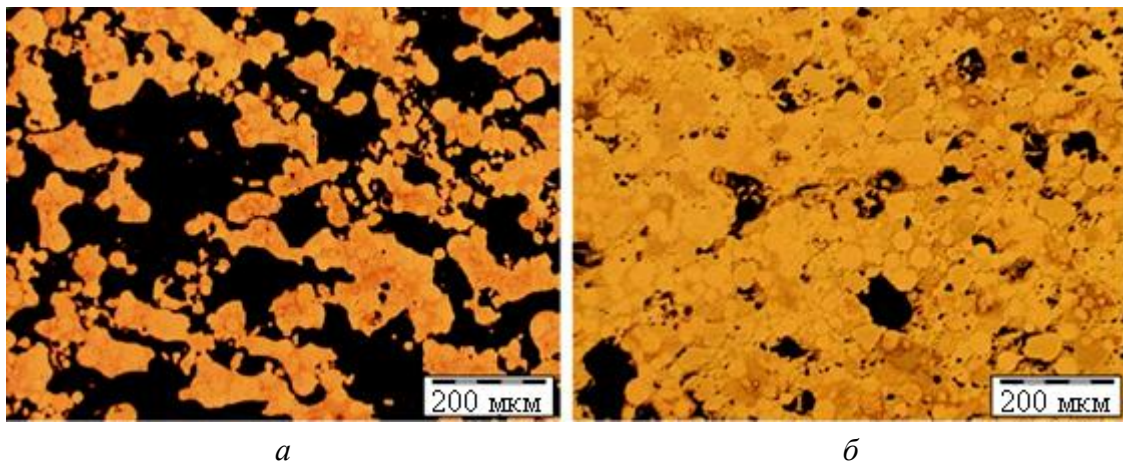


Рисунок 3.8 – Структура *SLS*- виробів (нікель-бронзовий сплав):

a – після лазерного спікання; *б* – після постобробки інфільтрацією

Глибина інфільтрації для різних варіантів складів основний матеріал-інфільтрат становить близько кількох міліметрів (рис. 3.9), що достатньо для практичного застосування виробів.

Отримані вироби можуть бути піддані механічній обробці (фрезеруванням, свердлінням, шліфуванням, поліруванням), електроерозійній обробці, нанесенню покриття. При цьому обмеження на складність геометрії деталі практично відсутні.

Як правило, подібну технологію використовують для швидкого виготовлення оснастки для лиття пластмас (прес-форми витримують до

200÷500 тис. циклів), а також для серійного виробництва деталей, що працюють в умовах тертя – зубчастих передач, валів, втулок тощо.

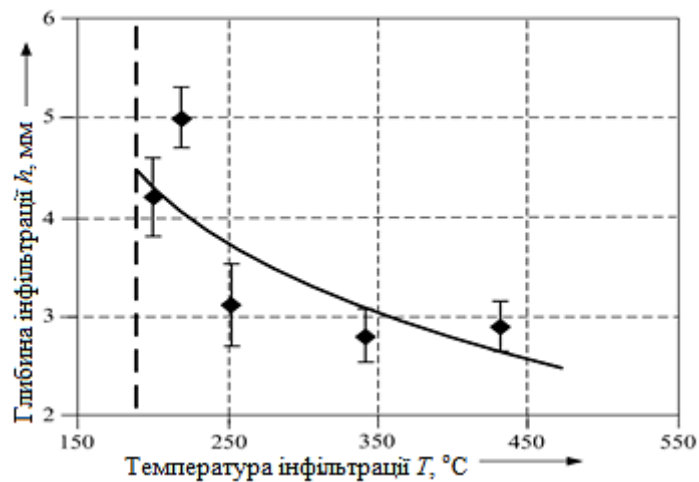


Рисунок 3.9 – Залежність глибини інфільтрації нікелевого сплаву бронзою від температури процесу: $h = 4,44(T/200)^{-0,63}$;

- ◆ – експериментальні дані;
- – температура плавлення;
- - - усереднена крива

Виготовлення високоякісних виробів з неметалевих порошків методом селективного лазерного спікання є досить складним завданням внаслідок особливостей їх властивостей – низької здатності до спікання, обмеженої пластичності, проблематичності механічної обробки тощо. Застосування інфільтрації як постпроцесу у ряді випадків є економічним механізмом виготовлення виробів з неметалів зі складною геометрією та необхідними властивостями.

Наприклад, серед порошкових полімерів полістирол набув особливої популярності в галузі прототипування, а також для промислового виготовлення штучної та малосерійної продукції. Вироби з порошку полістиролу, отримувані *SLS*-технологією, використовуються як моделі для традиційного лиття за випалюваними моделями. Для надання міцності, забезпечення з'єднання з ливниковою системою, а також підвищення формівності модель з полістиролу піддають інфільтрації, тобто просочують спеціальним складом на восковій основі.

Інфільтрація здійснюється в печах при нагріванні до 80 °C. Використання воску як інфільтрату має певні переваги: віск розплавляється

в опоці при випалюванні полістиролу і, коли полістирол набуває плинності, фактично видаляє його з форми, тим самим зменшуючи масу частини полістиролу, що випалюється, і знижуючи масу зольного залишку.

Полістирольні моделі на різних стадіях формування та отримувані на їх основі металеві вироби представлені на рис. 3.10.

Інфільтрація як постпроцес також може застосовуватись для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик *SLS*-виробів з керамічних порошків, наприклад з конструкційної кераміки на основі карбіду кремнію.

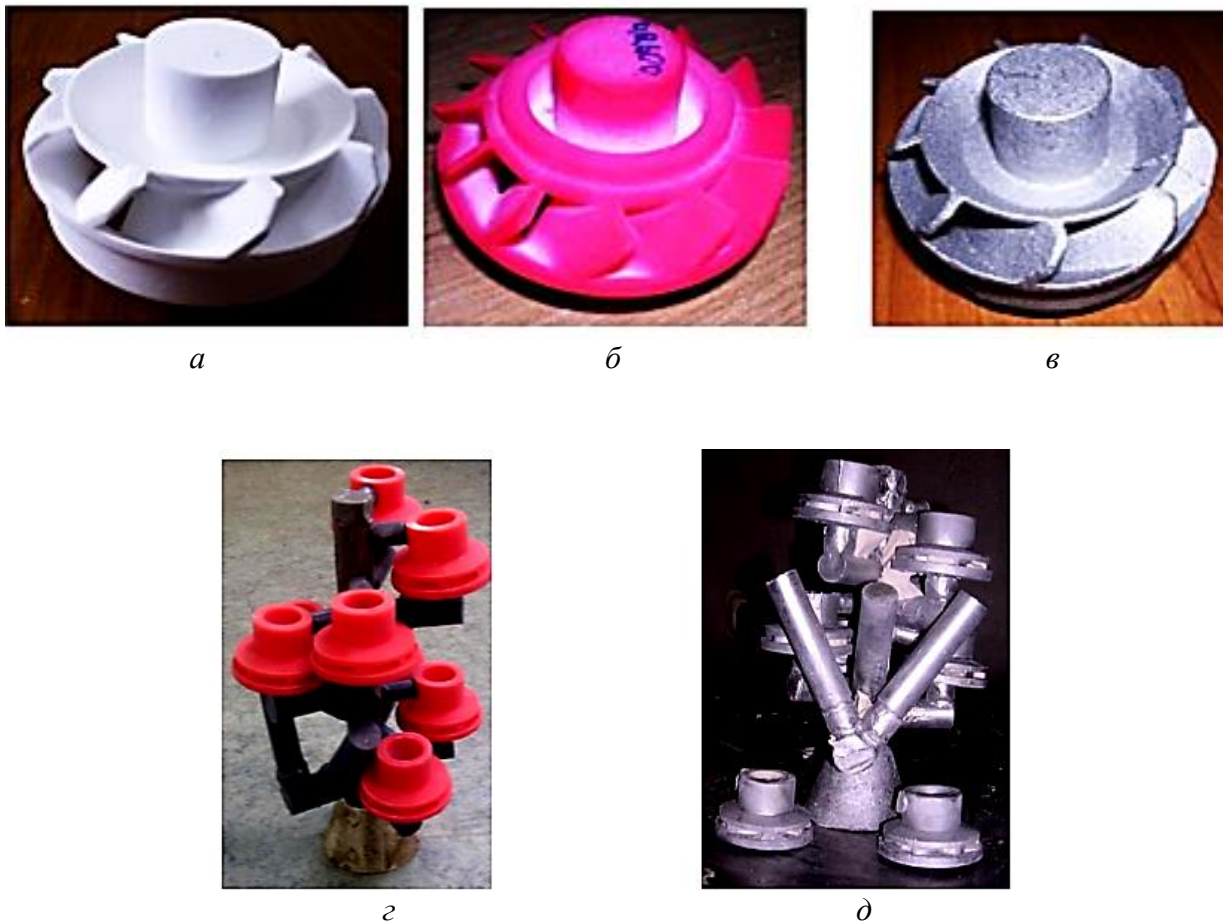


Рисунок 3.10 – Полістирольні моделі та металеві вироби, отримані на їх основі:
а – модель після пошарового вирощування; *б* – модель після інфільтрації;
в – чавунний виливок;
г – інфільтровані моделі; *д* – алюмінієві виливки

Реакційно-пов'язаний карбід кремнію (*PC-SiC*) є керамікою, яка широко застосовується в різних галузях промисловості, де потрібні високотемпературна міцність та стабільність властивостей, у тому числі в

електроніці, суднобудуванні, металургії, машинобудуванні. Селективне лазерне спікання з інфільтрацією кремнієм як постпроцес забезпечує досить великий вибір дизайну виробів, необхідний рівень властивостей і розширює можливі сфери застосування даного матеріалу.

Формування кінцевого виробу проходить стадії селективного лазерного спікання (суміші порошку карбиду кремнію і фенолу), наступного нагрівання, карбонізації сполучної речовини і далі нагрівання (до 1650 ° С) у присутності кремнієвих гранул для активізації інфільтрації.

В результаті сприятливого поєднання поверхневої енергії, низької в'язкості та інших параметрів, необхідних для реалізації інфільтрації, забезпечується швидке та ефективно заповнення пор розплавленим кремнієм, при взаємодії якого з SiC формується структура так званого реакційно-пов'язаного карбиду кремнію з отриманням щільної кінцевої будови (рис. 3.11).

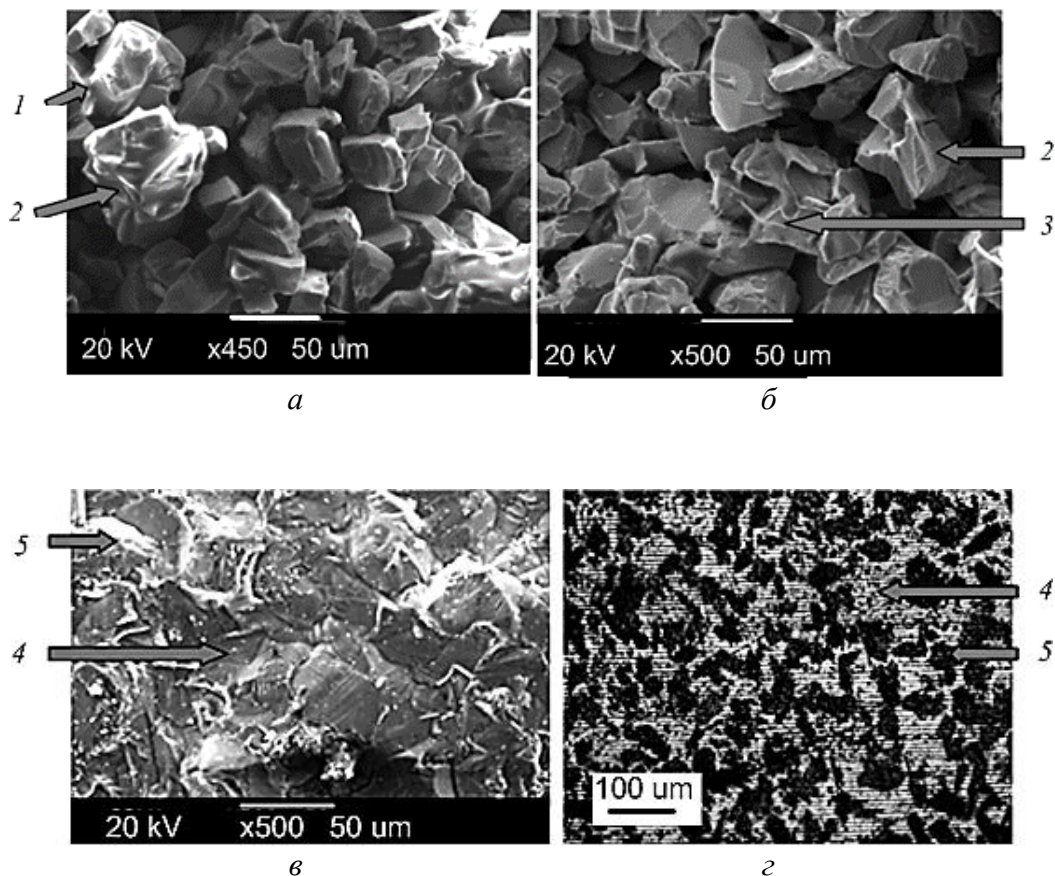


Рисунок 3.11 – Формування виробу з конструкційної кераміки на основі карбиду кремнію PC-SiC:

a – виріб після селективного лазерного спікання; *б* - виріб після карбонізації сполучної речовини; *в*, *г* – інфільтрований виріб;
a, *б*, *в* – скануюча електронна мікроскопія; *г* – оптична мікроскопія

3.2.2. Специфіка термічної та хіміко-термічної обробки як постпроцесу технології виготовлення виробів із сталей і кольорових металів та сплавів селективним лазерним спіканням

Найважливішими процесами етапу постобробки, пов'язаного з удосконаленням фізико-механічних та хімічних властивостей виробів адитивного виробництва (АВ), є такі: термічна, хіміко-термічна та термомеханічна обробка.

Одним із найбільш досліджених і досить широко застосовуваних постпроцесів для АВ є *термічна обробка* – процес обробки виробів із металів та сплавів шляхом температурного впливу та подальшого охолодження з певною швидкістю з метою зміни їх структури та властивостей у заданому напрямку.

Термообробка як постпроцес рекомендована насамперед для виробів, отриманих на основі вибіркового спікання порошкових середовищ – *SLS (SLM)*. Особливості реалізації цього процесу в адитивному виробництві багато в чому аналогічні до процесу традиційної порошкової металургії. Вироби піддають термообробці для зняття залишкових напружень, гомогенізації мікроструктури або зміцнення матеріалу шляхом формування твердих розчинів, що приводить до підвищення та стабілізації механічних властивостей. Тому термічна обробка так само важлива, як і сам процес адитивного виробництва для забезпечення високої якості виробів.

Можливість впливу на структуру та властивості порошкового матеріалу за допомогою термообробки обумовлена тим, що кожна порошкова частка являє собою металевий мікрозливочок, в якому при нагріванні та охолодженні відбуваються такі ж перетворення, як і в макрооб'ємах литого та деформованого сплаву.

У той же час порошкові заготовки за деякими параметрами суттєво відрізняються від злиwkів. Наявність пор і розвиненої поверхні зумовлюють підвищену схильність порошкових заготовок до окислення та знеуглецьовування, тому при нагріванні потрібні ефективніші заходи захисту їх поверхні. Крім того, пористі матеріали мають низьку теплопровідність, є чутливими до теплових ударів, внаслідок чого час їх нагрівання істотно зростає. Пори, будучи концентраторами напружень, при різкому охолодженні створюють зони пікових напружень, які можуть ініціювати розвиток тріщин.

Термообробка порошкових матеріалів може бути попередньою та остаточною. Попередня термообробка (відпал, нормалізація) проводиться не лише на вирощених виробках, а й на вихідній порошковій масі. Метою подібної обробки є зниження твердості, поліпшення оброблюваності та зняття напружень. Остаточна термообробка (загартування та відпуск) застосовується для готових виробів з метою надання їм заданої структури та необхідних фізико-механічних властивостей.

Особливості термообробки порошкових матеріалів найбільш повно вивчені стосовно сталей. Пористість порошкової сталі впливає як на технологію термообробки, так і на її результати. Порівняно з литими матеріалами порошкові сталі мають велику сумарну поверхню і підвищений запас вільної енергії. Це інтенсифікує перлітно-аустенітне перетворення. Спостерігається деяке підвищення температури початку мартенситного перетворення та зниження твердості мартенситу.

При загартуванні порошкових сталей підвищується ймовірність знеуглецьовування і має місце підвищений розкид твердості. Крім звичайних термічних і фазових напружень, також виникають додаткові напруження, пов'язані з наявністю пор, міжчасткових тріщин. Це підвищує твердість порошкової сталі та знижує її міцність. Для зняття залишкових напружень та підвищення міцності зазвичай проводиться відпуск в діапазоні температур 250÷400 °С.

Вироби із кольорових металів (на основі сплавів міді, алюмінію тощо), отримані адитивними технологіями, також часто передбачають термообробку.

Наприклад, порошкові латуні більшою мірою, ніж литі, схильні до корозії під впливом залишкових напружень. Тому вироби з даного матеріалу для зняття напружень відпалюють при $T = 400\div 500$ °С.

При термообробці порошкових виробів як із чорних, так і кольорових металів особливу увагу слід приділяти режиму нагрівання з урахуванням підвищеної схильності пористих матеріалів до виникнення напружень.

Так, за наявності поліморфних перетворень поблизу точок переходу рекомендується ізотермічна витримка або зменшення швидкості нагрівання. Повільне нагрівання рекомендується для виробів з різкими переходами

перерізів. Не слід нагрівати та охолоджувати пористі вироби в сольових розчинах через проблематичність видалення солей із пор та схильності виробів до електрохімічної корозії при взаємодії з солями.

Етап термічної обробки є одним із найбільш відпрацьованих у сфері адитивних технологій для реалізації постобробки металевих виробів, отриманих селективним лазерним спіканням (стандарт *ASTM F3301-18a*).

Проте специфіка формування мікроструктури сплавів в умовах адитивного виробництва, зокрема, підвищені швидкості охолодження порівняно з традиційним металургійним переділом і можливість отримання нерівноважних структур, наявність текстури та анізотропії механічних властивостей вимагають подальшого розвитку методів цієї групи.

Як постпроцес для виробів, отриманих спіканням порошкових середовищ, у тому числі і *SLS*, може бути також застосована **хіміко-термічна обробка** – дифузійне насичення поверхневого шару яким-небудь легуючим елементом шляхом витримки при високих температурах в активних газових, рідких або твердих середовищах. Для порошкових матеріалів і виробів найчастіше застосовують цементацію, азотування та сульфідкування, тобто насичення поверхні вуглецем, азотом та сіркою.

Наявність пористості сприяє інтенсифікації дифузії, на якій ґрунтується хіміко-термічна обробка. У литих матеріалах легуючий елемент дифундує вглиб по зернах і міжзеренних границях, тоді як у пористих порошкових матеріалах дифузія протікає по всій поверхні частинок (рис. 3.12), що значно скорочує час поверхневого насичення. Крім того, у порошкових заготовках з відкритою пористістю за достатнього часу витримки можна отримати об'ємне насичення матеріалу легуючими елементами.

Найбільш активними робочими середовищами при хіміко-термічній обробці є газы. Вони забезпечують швидке підведення насичуючого елемента до поверхні виробу, що обробляється.

У рідких середовищах насичення відбувається або в результаті прямого контакту рідкого середовища з поверхнею або через газову фазу, якщо спостерігається виділення газів з рідини.

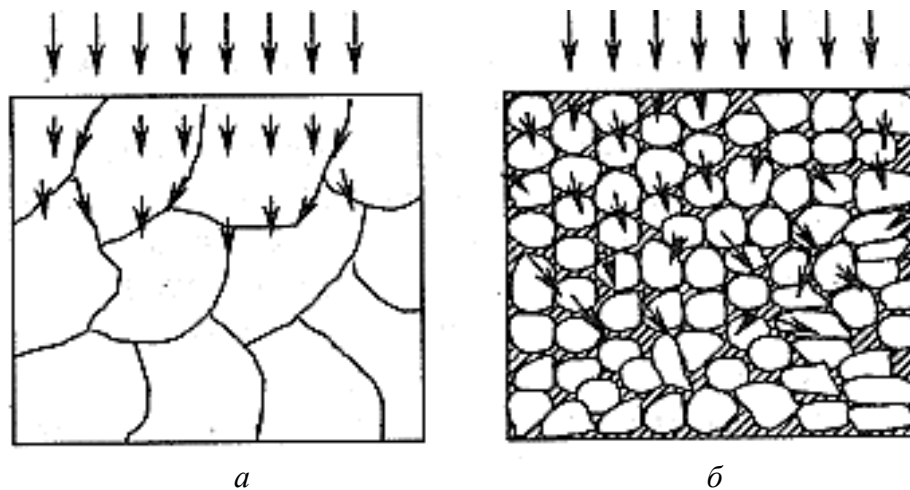


Рисунок 3.12 – Особливості дифузії в литих (а) та порошкових (б) матеріалах

Мінімальна швидкість насичення характерна для твердих середовищ через малу поверхню контакту та низьку активність твердих тіл. Тому при необхідності проведення хіміко-термічної обробки як постпроцесу адитивного виробництва в твердих середовищах рекомендується застосовувати активатори, за допомогою яких формується активна газова фаза.

3.2.3. Термомеханічна обробка гарячим ізостатичним пресуванням

Термомеханічна обробка, аналогічно термічній та хіміко-термічній обробці, є одним із поширених постпроцесів адитивного виробництва.

Даний вид обробки поєднує термічну обробку із пластичною деформацією, сприяє підвищенню механічних властивостей матеріалів.

Технологія термомеханічної обробки набула подальшого розвитку у зв'язку зі створенням адитивних технологій. Зокрема, перспективною технологією постобробки виробів селективного лазерного спікання, що застосовується замість термообробки і використовується багатьма аерокосмічними компаніями, є модифікований метод термомеханічної обробки – *гаряче ізостатичне пресування (ГІП)*.

Метод ГІП – один із способів ущільнення металевих або керамічних матеріалів шляхом застосування високого ізотропного тиску, створюваного газовим середовищем, при високій температурі (нижче за температуру плавлення матеріалу).

Метод гарячого ізостатичного пресування використовується у двох випадках: 1) для консолідації порошку у закритому металевому контейнері; 2) для усунення закритої пористості в литій або спеченій деталі, що зумовлює можливість застосування методу як постпроцесу адитивних технологій (*SLS*, *SLM*), (рис. 3.13).

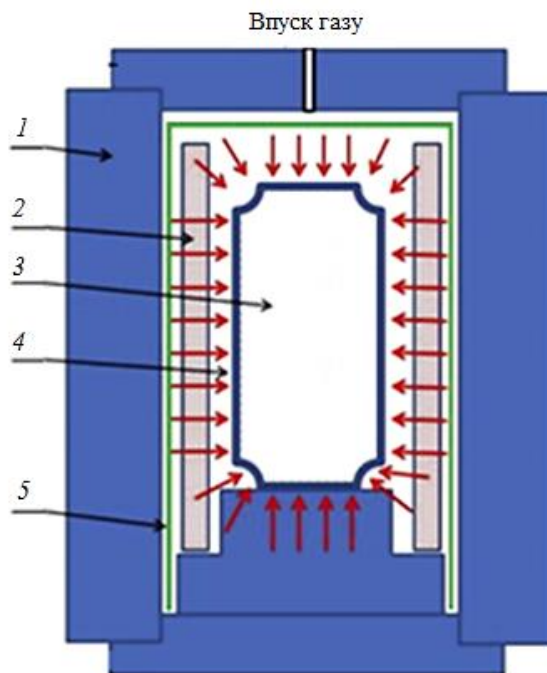


Рисунок 3.13 – Схема гарячого ізостатичного пресування:

1 – камера тиску; 2 – нагрівачі; 3 – капсула; 4 – порошок (виріб);
5 – теплоізолятор

Капсула, що містить виріб у процесі ГП, може бути виконана у вигляді тонкої оболонки (зі сталі, алюмінію, кераміки), форма якої максимально наближена до форми готового виробу.

Технологія ГП застосовується як для отримання виробів простої форми (наприклад, циліндричної), так і виробів складної форми з мінімальними допусками, зокрема з великим відношенням довжини до діаметру, з тонкими стінками. Вироби відрізняються однорідною густиною, дисперсністю структури, досить високими механічними властивостями.

Універсальність гарячого ізостатичного пресування визначається термодинамічною природою процесу ущільнення: при накладенні тиску всебічного стиснення мимовільні процеси, що відбуваються, сприяють підвищенню щільності системи в результаті заварювання пор. Механізмами заварювання технологічної пористості є пластична деформація та дифузія;

остання забезпечує як вакансійне розчинення мікропор, так і дифузійне зварювання стінок пор.

Формування об'єкта методами адитивного виробництва включає процеси послідовного розплавлення/кристалізації шарів матеріалу. При з'єднанні шарів між ними виникає межа розділу, що є структурним дефектом адитивного об'єкта і може містити несутільність технологічного характеру. Технологічними дефектами є також неповне розплавлення частинок порошку, наявність спадкових границь порошку в шарі і т. д. Крім цього, при затвердінні шару розплаву може виникати усадкова мікропористість, оскільки для металевих сплавів питомий об'єм рідкої фази завжди більший за об'єм твердої фази, різниця об'ємів компенсується утворенням мікропор.

Структурні дефекти можуть істотно впливати на механічні властивості та експлуатаційні характеристики виробів адитивного виробництва. Вплив пор і несутільностей у виробках може бути аналогічним наслідкам цих дефектів у ливарних сплавах. Відомим способом ущільнення литої структури за рахунок мінімізації усадкової пористості в ливарних сплавах є гаряче ізостатичне пресування, тому є доцільність використання ГП для обробки виробів АВ.

Загальною проблемою адитивних технологій є забезпечення оптимальної мікроструктури синтезованого матеріалу та усунення технологічних дефектів, насамперед пористості, тією чи іншою мірою характерної для різних видів процесів, де використовується порошкове вихідне середовище.

Пористість виробів адитивного виробництва залежить від матеріалу, виду процесу та параметрів його режиму, може становити від кількох десятих часток відсотка до кількох десятків відсотків. Найбільш актуальне завдання зниження пористості в адитивних технологіях, пов'язаних із розплавленням вихідного матеріалу (наприклад, *SLM*).

Пори у виробках, одержаних за технологією селективного лазерного плавлення, можуть бути двох видів залежно від причин формування. Газові пори викликані неповнотою виходу газів із розплаву при лазерній обробці. Бульбашки газу мають сферичну форму, яку вони зберігають і після затвердіння металу. Пори другого типу утворюються через недостатнє проплавлення порошкового шару. В результаті в місцях, де частинки розплавлялися в повному обсязі або не сталося злиття розплавлених

частинок порошку з раніше обробленим шаром, утворюються плоскі пори, розташовані перпендикулярно напрямку вирощування. Пори другого типу значно впливають на механічні властивості виробів внаслідок їх більшого розміру, а також плоскої форми.

Залежно від розташування у структурі виробів АВ розрізняють відкриту та закриту пористість. Під відкритою пористістю розуміють відношення об'єму пор, з'єднаних із зовнішнім середовищем, до об'єму порошкової формовки, під закритою – відношення об'єму пор, що не сполучаються із зовнішнім середовищем, до об'єму порошкової формовки. Обидва види пористості негативно впливають на механічні властивості виробів.

Ефективним методом зниження закритої пористості у виробках адитивного виробництва є технологія гарячого ізостатичного пресування.

Застосування даної технології дозволяє підвищити пластичність та втомну міцність деталей, що істотно залежать від величини закритої пористості і, як правило, є визначальними властивостями для забезпечення якості виробів з металевих сплавів, у тому числі характеристик безпеки, що є актуальним для виробів аерокосмічної промисловості, де адитивне виробництво є перспективним для масового виробництва деталей.

Метод апробований на виробках із алюмінієвих, титанових, жароміцних нікелевих, інтерметалідних сплавах, конструкційних та інструментальних сталях, отриманих *SLS* та *SLM*-технологіями. Дані щодо механічних властивостей об'єктів з титанового сплаву після ГПП наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив гарячого ізостатичного пресування на механічні властивості зразків титанового сплаву Ti-6Al-4V, отриманих за допомогою адитивної технології *SLS*

Властивість	Традиційна технологія (відсутність ГПП)	Використання ГПП
Відносне подовження δ , %	14	22
Границя витривалості (границя втоми) σ , МПа	300 ($N > 10^7$)	580 ($N > 10^7$)

Важливим ефектом застосування ГПП як постобробки (наприклад, для зразків із жароміцного сплаву IN718, отриманих методом селективного

лазерного спікання) є можливість досягнення практично 100 % щільності, а також усунення текстурованості матеріалу з формуванням зеренної структури, близької до рівноосної. Це досить важливо, тому що подібні сплави призначені для роботи при підвищених температурах і розтягувальних навантаженнях.

При виготовленні виробів з використанням адитивних технологій як постпроцесів, що забезпечують оптимальну структуру та механічні властивості виробів, можливе застосування різних методів термічної та термомеханічної обробки як самостійних процесів (наприклад, відпал, гаряче ізостатичне пресування), а також у вигляді їх різної комбінації залежно від цілей постобробки та сфер застосування одержуваних виробів, наприклад, ГП + відпал; ГП + відпал + старіння і т. д.

3.3. Розмірна постобробка виробів адитивного виробництва

Розмірна обробка деталей у традиційних технологіях – цільовий робочий процес, при якому в результаті видалення припуску оброблена заготовка отримує близькі до заданих або остаточні розміри та форму з урахуванням видалення або нанесення матеріалу при фінішній обробці поверхні.

Розмірна обробка матеріалів зазвичай здійснюється процесами різання на металорізальних верстатах, а також електрофізичними, електрохімічними та хімічними методами видалення припуску. При цьому висока точність обробки деталей досягається забезпеченням деформації системи при незначній різниці температур між оброблюваною деталлю та навколишнім середовищем.

При обробці деталей на токарних, фрезерних, розточувальних та інших верстатах досягаються 11÷9 квалітети точності обробки та шорсткість поверхні $R_a = 10 \div 1$ мкм. Обробка деталей за 8÷5 квалітетом точності при шорсткості $R_a = 1 \div 0,08$ мкм зазвичай проводиться на шліфувальних, координатно-розточувальних та інших прецизійних верстатах, де сили, що діють, становлять $0,1 \div 0,5$ Н, а деформації системи – мікрометри та частки мікрометрів.

При електрохімічних та електрофізичних методах розмірної обробки чинні сили незначні, оскільки видалення припуску здійснюється шляхом оплавлення або розчинення мікрооб'ємів матеріалу. Це дозволяє знизити похибки, проте через оплавлення матеріалу та подальшої кристалізації утворюються дефектні поверхневі шари.

До розмірної обробки матеріалів можуть бути віднесені деякі спеціальні методи обробки тиском (ротаційне кування, прецизійне прокатування, ротаційне видавлювання, обкатування або накатування, екструзійне видавлювання та інші методи).

Оскільки розмірна обробка проводиться поетапно, прийнято поділяти її на такі види: попередня, напівчистова та чистова розмірна обробка.

До процесів розмірної обробки відносяться такі: точіння, фрезерування, свердління, протягування, електроімпульсна та електроіскрова обробка, шліфування тощо.

Слід зазначити, що трудомісткість розмірної обробки у машинобудуванні і приладобудуванні дуже висока і становить 30÷60 % від загальної трудомісткості виготовлення деталей.

3.3.1. Види розмірної обробки в процесах *SLA*, *SLS*

Однією з найважливіших переваг технологій адитивного виробництва є зниження обсягу, а деяких випадках – практична відсутність розмірної обробки при отриманні виробів.

Наприклад, ці процеси практично відсутні у *SLA*-технології. З урахуванням досить високої якості поверхні виробів лазерної стереолітографії (порівняно з механообробкою на багатоопераційних верстатах з ЧПК) для деяких виробів *SLA* застосовується переважно шліфування, особливості якого аналогічні традиційному шліфуванню полімерів-реактопластів.

Більшою мірою розмірна обробка як постпроцес реалізується в *SLS*-технології. Для *SLS*-виробів як постпроцес розмірної обробки застосовують традиційні методи різання – точіння, фрезерування, шліфування відповідно до необхідної геометрії деталі та експлуатаційних характеристик.

Особливості процесів пов'язані зі специфікою структури порошкових виробів. Будь-який вид механічної обробки порошкових матеріалів викликає пружну та пластичну деформацію, яка, у свою чергу, супроводжується тертям та виділенням тепла, ущільненням або розпушенням поверхневих шарів.

Наявність у порошковому виробі пор ускладнює його обробку різанням, знижує стійкість інструментів незважаючи на те, що зусилля різання при обробці пористих виробів зазвичай менше порівняно з обробкою безпористих об'єктів. Ця невідповідність пояснюється тим, що наявність пор робить нестабільним процес різання. Через знижену теплопровідність у зоні різання зростає температура, посилюється окислення та абразивний знос інструменту.

При різанні пористих матеріалів застосовують, як правило, інструменти із твердих сплавів.

Як охолоджувальне середовище доцільно використовувати інертні гази або оливи. Застосування традиційних змащувально-охолоджуючих рідин (ЗОР) на водній основі, а також рідин, що містять кислоти і луги, не рекомендується, оскільки потрапляння ЗОР в пори оброблювальної заготовки приводить до корозії при подальшому зберіганні або експлуатації виробів. Просочення оливою пористих виробів істотно покращує їх оброблюваність різанням. Зусилля різання знижується в $1,3 \div 1,5$ рази, з'являється можливість у $2,5 \div 4$ рази підвищити швидкість різання та знизити шорсткість виробу.

Допустима швидкість різання залежить від складу порошкового матеріалу та матеріалу інструменту. Наприклад, при точінні пористих виробів на основі сталей різцями з твердого сплаву швидкість різання становить $50 \div 200$ м/хв. Нижчі швидкості різання не рекомендуються через зростання шорсткості поверхні.

Якість поверхні також залежить від подачі. Чим більша пористість виробу, тим меншою має бути подача для отримання поверхні з прийнятною шорсткістю.

3.3.2. Гібридні процеси на базі поєднання адитивного виробництва заготовки та розмірної механічної обробки

Наступним кроком у розвитку технологій адитивного виробництва, в тому числі з реалізацією етапу розмірної постобробки, є створення так званих *гібридних процесів*.

Гібридний процес (гібридна технологія) визначається як одночасна та контрольована взаємодія механізмів та/або джерел енергії, що істотно впливають на продуктивність процесу..

Незалежно від виду, гібридне виробництво зазвичай спрямоване на підвищення ефективності та продуктивності процесу як головний критерій поліпшення.

Поява та розвиток адитивного виробництва, де поліпшення орієнтоване передусім на якість деталей та подальшу їх функціональність, а не лише на процес, суттєво розширило рамки визначення гібридних технологій.

В адитивному виробництві термін гібридне виробництво має багатофункціональне значення та застосовується для характеристики виготовлення виробів методом багатокомпонентного друку, з використанням комбінованого обладнання (друк осадженням + механообробний центр), комбінованих процесів (друк + міжшаровий лазерний переплав).

За своєю суттю *гібридні адитивні процеси* визначаються як використання адитивних технологій у поєднанні з одним або більше процесів або видів енергетичного впливу, що пов'язані і синергетично впливають на якість виробу, його функціональність та/або продуктивність процесу.

Аналогічно загальному визначенню гібридного процесу, гібридні адитивні технології пов'язані з методологією, що відноситься до процесів, обладнання, матеріалів.

Найбільшим класом гібридних адитивних технологій є процеси, засновані на об'єднанні в одній робочій області адитивного отримання заготовки та розмірної механічної обробки її поверхонь, переважно

з'єднувальних з іншими деталями або виконуючих певні функції в процесі експлуатації виробу.

Технологічне обладнання для побудови об'єктів методами гібридного адитивного формоутворення може створюватись на базі серійних металорізальних верстатів з інтеграцією в них адитивних модулів або оснащення обладнання для пошарового вирощування виробів механообробними виконавчими механізмами. Також можливе застосування роботизованих технологічних комплексів.

Компонування виробничого осередку будується за модульним принципом, що забезпечує зміну його конфігурації та масштабування відповідно до поставлених завдань.

До складу установок гібридного формоутворення входять також системи контролю структури окремих шарів та геометричних характеристик виробів, моніторингу та адаптивного управління технологічними процесами.

Додавання функцій 3D друку металорізальним верстатам та оброблювальним центрам є одним із найбільш ефективних технічних рішень у сфері адитивного виробництва, що забезпечує отримання виробів високої якості та точності. Цей напрямок інтенсивно розвивається провідними зарубіжними верстатобудівними фірмами, виробниками адитивного обладнання, є предметом численних наукових досліджень. У перспективі очікується, що такі модулі стануть стандартними та широко застосовуваними у виробництві.

Існують установки на основі об'єднання в єдиному процесі різних поєднань адитивних процесів та розмірної обробки, наприклад *SLS (SLM, FDM)* та фрезерування, або точіння, свердління, шліфування і т. д.

Створенням установок гібридного формоутворення вирішується комплекс технічних завдань:

- інтеграція адитивного модуля в структуру верстата та налагодження його функціонування;
- моделювання;
- оптимізація параметрів адитивних процесів для різних матеріалів;
- аналіз розподілу температурних полів під час створення виробу;

- визначення властивостей використовуваних матеріалів та оцінка їх відповідності заданому значенню;

- розробка методів моніторингу;

- суміщення 3D друку та механообробки в одній керуючій програмі.

Наприклад, при формуванні виробів пошаровим спіканням або плавленням (*SLS*, *SLM*) задана точність та якість забезпечуються механообробкою поверхні через певну кількість шарів ($5\div 10$) в єдиному замкнутому об'ємі. При цьому здійснюється безперервний контроль точності та якості виробу, що вирощується.

Процес гібридного адитивного формоутворення призначений для виготовлення виробів різного типу та рівня складності, що застосовуються в авіаційній, ракетно-космічній промисловості, машинобудуванні, енергетиці, нафтогазовій промисловості. Можливе формування виробів із різних матеріалів – металевих, неметалічних.

До основних переваг технологій гібридного формоутворення слід віднести такі:

- підвищення розмірної точності виробів, що виготовляються адитивними методами, за рахунок механізації та автоматизації операцій постобробки;

- можливість отримання складнопрофільних виробів, виготовлення яких традиційними методами є економічно недоцільним, у тому числі з інтегрованими електричними та електронними компонентами;

- зниження трудомісткості постобробки;

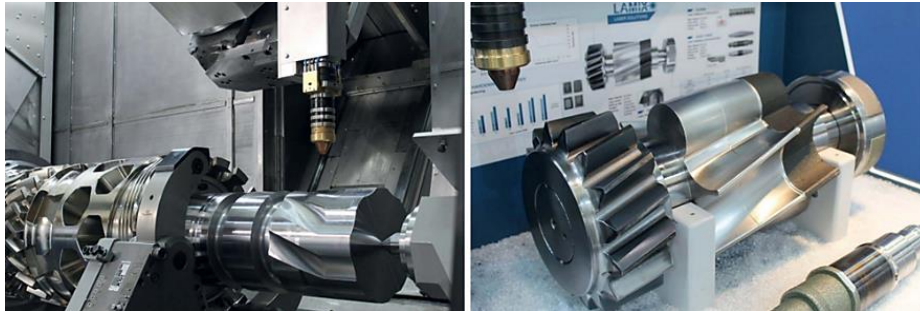
- зниження собівартості та підвищення продуктивності виробничих процесів;

- висока гнучкість виробництва та інші.

Деякі приклади установок та виробів, отримуваних гібридними адитивними процесами, наведено на рис. 3.14.



a



б



в

Рисунок 3.14 – Модулі гібридного адитивного формоутворення та отримувані вироби:

- a – головки лазерного наплавлення, вбудовані в серійні металорізальні верстати і промислові роботи (*AMBIT Series 7, Hybrid Manufacturing Technologies*);
- б – робоча зона та виріб, виготовлений на токарно-фрезерному оброблювальному центрі (*WFL M80 MillTurn*), оснащеному лазерною наплавлювальною головкою;
- в – приклади виробів, виготовлених методом гібридного формоутворення (обладнання *DMG MORI, Matsuura*)

3.4. Фінішна обробка виробів адитивного виробництва

При розмірній обробці деталей способами різання поряд з досягненням необхідної точності зазвичай видаляються дефектні поверхневі шари, що виникли на попередніх операціях, знижується шорсткість і підвищується якість поверхні, тобто процеси розмірної обробки в багатьох випадках поєднують оздоблювальні процеси обробки поверхні.

При отриманні значень показника шорсткості $R_a = 0,02 \div 0,01$ мкм необхідно застосування таких способів обробки поверхні, як доведення, тонке шліфування, хонінгування, суперфінішування, полірування, притирання і т. д.

Поруч із цим виникають ситуації, коли задана точність є невисокою, але високими є вимоги до шорсткості поверхні, або ставиться завдання надання поверхні особливих функціональних властивостей (зносостійкості, кислотостійкості, корозійної стійкості тощо.). У цих випадках, поряд з вищезгаданими способами, застосовуються процеси зміцнення деталей поверхнево-пластичним деформуванням, нанесення покриттів і т. д., при яких відбувається зміна якості поверхні, забезпечуються необхідні властивості, а розміри в більшості випадків залишаються в межах поля допуску.

Таким чином, фінішна обробка поверхні – цільовий робочий процес, внаслідок виконання якого досягається необхідна якість поверхні деталей. Фінішна обробка поверхні зазвичай є завершальною операцією технологічного процесу виготовлення деталей.

Відмінною особливістю цього робочого процесу є незначна зміна геометричних розмірів деталі в межах поля допуску.

Специфіка формування виробів адитивними технологіями висуває проблему адаптації існуючих та розробки нових методів фінішної обробки виробів відповідно до вимог забезпечення високої якості поверхневого шару вирощуваних виробів.

3.4.1. Постпроцес абразивно-екструзійної обробки

Серед традиційних технологій фінішної обробки, що використовуються в адитивному виробництві, – піскоструминна обробка, полірування тощо. Досить ефективною та широко застосовуваною є **абразивно-екструзійна обробка** (АЕО), або екструзійне хонінгування, екструзійне шліфування – процес, що полягає в екструзії вздовж оброблюваних поверхонь в'язкопружних робочих середовищ, наповнених абразивними (алмазними) зернами. Метод дозволяє значно розширити технологічні можливості обробки важкодоступних поверхонь складнопрофільних деталей та є ефективним при отриманні виробів з герметичними каналами.

При реалізації цієї технології формується спрямований потік, на поверхні якого розташовані абразивні зерна. Слідуючи внутрішньою поверхнею оброблюваного каналу, потік забезпечує взаємодію мікровиступів активних зерен з мікронерівностями поверхні, рис. 3.15.

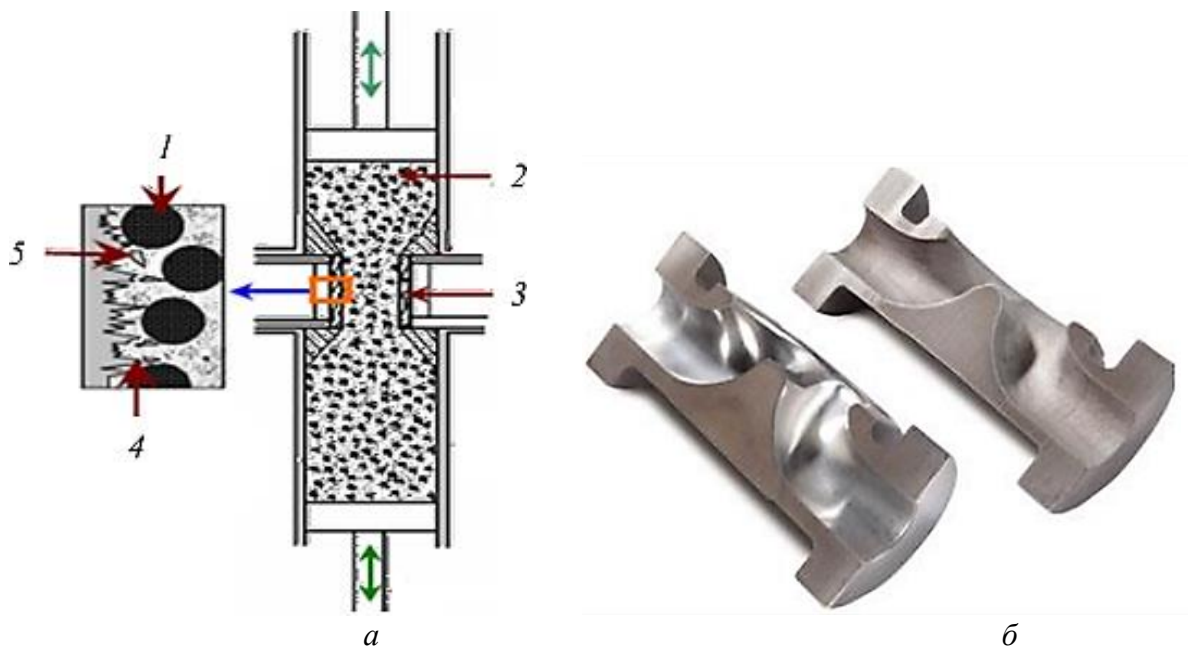


Рисунок 3.15 – Постпроцес абразивно-екструзійної обробки:

- a* – схема реалізації процесу; *б* – отримані вироби;
1 – абразивне зерно; 2 – частки абразиву; 3 – оброблюваний виріб;
4 – нерівності поверхні; 5 – мікростружка

В даний час процес абразивно-екструзійної обробки отримує все ширше застосування, витісняючи гідроабразивну обробку.

При цьому виді обробки можуть бути реалізовані різні види контактних процесів, що визначають характер обробки, – від пружної та пластичної деформації до мікрорізання. Можлива обробка різних матеріалів – неметалів (наприклад, фотополімерів, *SLA*), металевих порошкових матеріалів (*SLS*), включаючи вироби з важкооброблюваних матеріалів, наприклад, корозійностійкої сталі.

У процесі абразивно-екструзійної постобробки виробів адитивного виробництва формується поверхневий шар, що характеризується залишковими стискальними напруженнями. Величина шорсткості залежить від матеріалу виробу, режимів обробки і може становити $2 \div 0,02$ мкм за параметром R_a .

3.4.2. Формування функціонально-захисних покриттів на поверхні виробів адитивного виробництва

Проблема зменшення шорсткості поверхні виробів адитивного виробництва (АВ) може бути вирішеною шляхом *формування покриття на поверхні вирощених виробів (так звана адитивна постобробка)*.

Ця технологія має ряд переваг, насамперед пов'язаних з тим, що механічні властивості поверхневого шару виробів не змінюються, можливе формування покриттів на виробах складної форми, що є складною задачею для процесів механічної обробки.

Актуальність та особлива роль цієї технології пов'язані також із тим, що методи пошарового синтезу не завжди забезпечують необхідні функціонально-експлуатаційні характеристики виробів для різних сфер застосування. Це є наслідком обмеження вибору конструкційних матеріалів для конкретних технологій адитивного виробництва, особливостей формування структури та властивостей кінцевих виробів.

Технологія формування покриттів є найважливішим засобом модифікації поверхні виробів адитивного виробництва та охоплює широке коло процесів, які можуть бути застосовані для покращення естетичності деталей, як технології фінішної обробки, що забезпечують

необхідну якість поверхні, а також як процес забезпечення функціональності виробу за рахунок підвищення міцності, твердості, хімічної стійкості, надання електропровідності і т. д. Загалом процеси формування покриття спрямовані на перетворення напівфабрикату на готову продукцію, відповідну призначенню.

Ключовою операцією постобробки виробів адитивного виробництва перед нанесенням покриттів є підготовка поверхні, яка визначає основні показники якості покриттів – суцільність, міцність адгезії та захисні властивості.

Під час підготовки поверхні повинні бути вирішені дві найважливіші задачі: 1) видалення з поверхні адсорбованих речовин – органічних забруднень, жирів, оксидів та інших поверхневих дефектів; 2) активування поверхні.

Видалення забруднень та активація поверхні можуть здійснюватися як у єдиному технологічному процесі, так і окремо. Принципово будь-яке видалення фізично або хімічно адсорбованих речовин з поверхні її активує, оскільки відновлюються обірвані зв'язки поверхневих атомів, їх асиметрія і відповідно підвищується рівень поверхневої енергії.

У практиці нанесення покриттів, зокрема в адитивному виробництві, знайшли застосування такі основні методи підготовки поверхні виробів: знежирення; травлення; механічна дія (струменево- та віброабразивна обробка, шліфування, полірування тощо); термічний та хіміко-термічний вплив; електрофізичний вплив; вплив світловими потоками тощо.

Покриття, що осаджують на вироби адитивного виробництва, можуть бути систематизовані за різними ознаками:

- за конструктивними особливостями та видом матеріалу основи, на яку наноситься покриття;
- за призначенням покриття та виробу в цілому;
- за структурою покриття;
- за складом та фізико-механічними властивостями покриття, а також його впливом на механічні та інші характеристики базового матеріалу;
- у разі захисних покриттів – за умовами експлуатації виробу з покриттям, ступенем агресивності експлуатаційного середовища та необхідною довговічністю захисту;
- за методом отримання покриття;
- за екологічністю матеріалу покриття та технологічним процесом його

формування;

- за економічною доцільністю.

Наприклад, *згідно з призначенням* покриття, у тому числі осаджувані на АВ-вироби, класифікують на декоративні, захисні, функціональні.

Декоративні покриття широко застосовують у практиці адитивного виробництва (*SLA, SLS, SLM*) для усунення видимих дефектів поверхні, підвищення естетичності, маркетингових завдань. Дані покриття досить поширені при виробництві побутових виробів, в ювелірній та медичній практиці.

Захисні покриття забезпечують захист виробу від різних зовнішніх факторів – зносу, корозії, теплових та радіаційних потоків. Відповідно до призначення захисні покриття діляться на зносостійкі, корозійностійкі, зміцнюючі, теплостійкі, електроізоляційні, світловідбивні, водовідштовхувальні і т. д. Всі ці функції покриттів актуальні для виробів залежно від їх застосування.

У свою чергу, кожен із зазначених видів покриттів поділяється на типи відповідно до захисту від конкретних видів руйнівних факторів. Наприклад, зносостійкі покриття відповідно до виду зносу виробу можуть бути фрикційними та антифрикційними, антиадгезійними, стійкими до абразивного та ерозійного зносу тощо.

Внаслідок застосування захисних покриттів підвищуються довговічність та надійність експлуатації виробу, конструкції.

Функціональні покриття забезпечують виконання головної функції виробу, тоді як основа, на якій вони сформовані, виконує роль несучого каркаса. До таких покриттів відносяться, наприклад, покриття для підвищення твердості, міцності, терморегулюючі покриття зі спеціальними оптичними властивостями і т. д.

У зв'язку з досить широким застосуванням виробів адитивного виробництва в медицині приділяють велику увагу покриттям з певними біомедичними властивостями – біоінертними, біоактивними, що важливе, наприклад, у процесі остеоінтеграції в ендопротезуванні.

Найчастіше передбачається змішана роль покриттів, тобто застосовують покриття, що поєднують дві або більше функцій – захисно-декоративні, декоративно-функціональні, захисно-функціональні тощо (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Стереолітографічний виріб після *SLA* (а) та після нанесення декоративно-функціонального покриття хрому (б)

За хімічним складом використовувані в постпроцесах адитивного виробництва покриття ділять на органічні, неорганічні, комбіновані.

До групи *органічних покриттів* відносяться всі різновиди лакофарбових покриттів. Їх товщина – від десятків до сотень мікрометрів залежно від призначення. Призначення лакофарбових покриттів – декоративні функції і навіть захисні, наприклад, захист металевих адитивних виробів від корозії.

Покриття цієї групи прийнятні для різних конструкцій виробів, незалежно від розміру та форми; економічні порівняно з іншими видами захисних покриттів; можуть легко відновлюватися при пошкодженні; відрізняються різноманітністю зовнішнього вигляду та кольору. Зазвичай покриття є багат шаровими, тобто формуються шляхом осадження декількох тонких шарів, що дає більший ефект (з урахуванням пористості *SLS* виробів) порівняно зі збільшенням товщини одноразово нанесеного шару.

За допомогою лакування можна отримати різні види оздоблення, такі як глясовий або металевий блиск, можна приховати поверхневі дефекти та покращити зовнішній вигляд виробу. Лакові покриття можуть підвищити зносостійкість, твердість, водонепроникність поверхні деталі.

До *неорганічних покриттів*, що застосовуються в адитивному виробництві, відносяться металеві та неметалічні покриття, що складаються

з чистих металів, неметалевих елементів (Ni, Cr, Cu, Zn, Al, Mo, C, Si), сплавів (NiCr), оксидів (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2), безкисневих тугоплавких сполук (карбідів, боридів, нітридів), керметів, різних композицій цих матеріалів.

За структурою покриття, що використовуються в постпроцесах АВ, класифікують як *одно- та багат шарові, гомогенні та композиційні*.

Однією з основних умов, що визначають захисні характеристики будь-якого покриття, є безпористість. При нанесенні двошарових (і багат шарових) покриттів цю умову легше виконати, оскільки менш ймовірним є збіг каналів пор у покриттів, що мають різні структури та властивості.

Крім того, багат шарові композиційні покриття дозволяють посилити існуючі властивості або надати виробам нових характеристик, забезпечити їх багат функціональність. Дані покриття дозволяють заощаджувати дефіцитні матеріали.

Класичним прикладом захисно-декоративних покриттів є багат шарове покриття складу мідь-нікель, нікель-хром, мідь-нікель-хром тощо.

Товщина покриттів визначається особливостями структури виробу, що отримується адитивними технологіями, методом нанесення покриття, умовами його формування та становить від частинок мікрометра до кількох міліметрів.

Систематизація покриттів за методами отримання досить складна і неоднозначна. Наприклад, методи формування покриттів можуть бути класифіковані за такими ознаками:

- за фазовим станом середовища, з якого відбувається осадження матеріалу покриття;
- за станом матеріалу, що наноситься;
- за станом процесів, що визначають одну групу методів.

Зокрема, *за станом процесів, що визначають одну групу методів*, технології формування покриттів поділяються на механічні, фізичні, хімічні, електрохімічні, напиленням, наплавленням; *за фазовим станом середовища* – з твердого, рідкого, напіврідкого або пастоподібного стану, з газового середовища, розчину, плазми і т. д.

До перспективних для використання в адитивному виробництві насамперед відносять хімічні та гальванічні покриття, що відрізняються

широким спектром механічних і фізико-хімічних властивостей та відносною простотою реалізації технології нанесення. Остання обставина особливо актуальна для виробів адитивних технологій, у яких застосування інших способів нанесення покриття часто обмежено або температурним фактором, або складністю геометричної форми виробу.

У деяких випадках залежно від матеріалу виробу та його призначення як постпроцес може послідовно використовуватися кілька методів формування покриття, наприклад хімічний і електрохімічний, гальванічний та іонно-плазмовий. Можливе застосування комбінованих покриттів на основі поєднання металевих шарів із лакофарбовими як зовнішнього шару.

Хімічне формування покриття передбачає отримання металевих та неметалічних покриттів із розчинів солей без електричного струму від зовнішнього джерела. Прикладами отримання покриттів хімічним способом є такі: для металевих покриттів, отриманих відновленням, – нікелювання, мідіння, срібління тощо; для неметалічних покриттів, отриманих окисленням, – оксидування, фосфатування, хромування тощо.

Електрохімічний спосіб отримання покриття передбачає отримання металевого або неметалічного неорганічного покриття в електроліті під дією електричного струму від зовнішнього джерела.

Гальванічне покриття – електрохімічне покриття, отримане катодним відновленням металу. Гальванічні покриття отримують електроосадженням шару металу з електроліту, що містить іони цього металу. До складу електроліту входять прості або комплексні солі металу, що осаджується на катоді, а також речовини, що підвищують електропровідність електроліту, буферні, поверхнево-активні, блискоутворюючі і вирівнюючі добавки, що сприяють отриманню осадів із заданою структурою і характеристиками.

Наприклад, на *SLS*-вироби можуть бути нанесені гальванічні покриття для підвищення міцності або електричної провідності при екрануванні – нержавіюча сталь, мідь, нікель, хром або їх комбінація.

Гальванічні покриття можуть бути також використані для полімерних виробів. Наприклад, металізація *SLA*-виробів застосовується для різних цілей – електромагнітного екранування, забезпечення електропровідності, підвищення міцності до ударів, захисту від атмосферних впливів. Дана технологія має такі комбіновані характеристики, як однорідність покриттів,

простота в експлуатації, низька вартість і відсутність пошкодження підкладки.

Достатньо відпрацьовані стосовно адитивних технологій функціональні гальванічні металеві покриття на основі сплавів хрому, нікелю, міді, а також срібла та золота. Товщина покриттів варіюється у досить великому діапазоні (від 1 до 500 мкм) відповідно до призначення виробу.

Найбільш перспективною в адитивному виробництві (*SLA*, *FDM*) є технологія формування покриття як постпроцесу при комбінації хімічного та гальванічного методів. Ця поетапна схема передбачає реалізацію хімічної металізації полімеру з наступним гальванічним осадженням покриттів на вихідний електропровідний шар. Функціональне призначення даних покриттів – забезпечення електропровідності, а також створення структур із великою площею поверхонь виробу.

Металізовані основи на основі полімерних структур, отримуваних за технологією пошарового вирощування, мають ряд певних переваг порівняно з металевими виробами, виготовленими традиційними методами обробки різанням, пресуванням, литтям і т. д., серед яких найважливішими є створення об'єктів з розвиненою структурою поверхні та рельєфом; можливість відновлення покриття у випадку його руйнації; низька собівартість та малі терміни виробництва продукції; знижена вага конструкції виробів.

Металізація зразків полімерних основ, отриманих методом адитивних технологій, реалізується у два етапи (рис. 3.17):

1) створення хімічною металізацією попереднього електропровідного шару товщиною $0,2 \div 0,4$ мкм на основі міді (що має підвищену електро- та теплопровідність порівняно з покриттями з Ni, Zn, Cr, Ag) шляхом відновлення іонів металу у водних розчинах;

2) отримання необхідного технологічного шару (товщиною ~ 10 мкм) та параметрів поверхні покриття гальванічною металізацією міддю з використанням відповідних електролітів міднення та різних схем процесу.

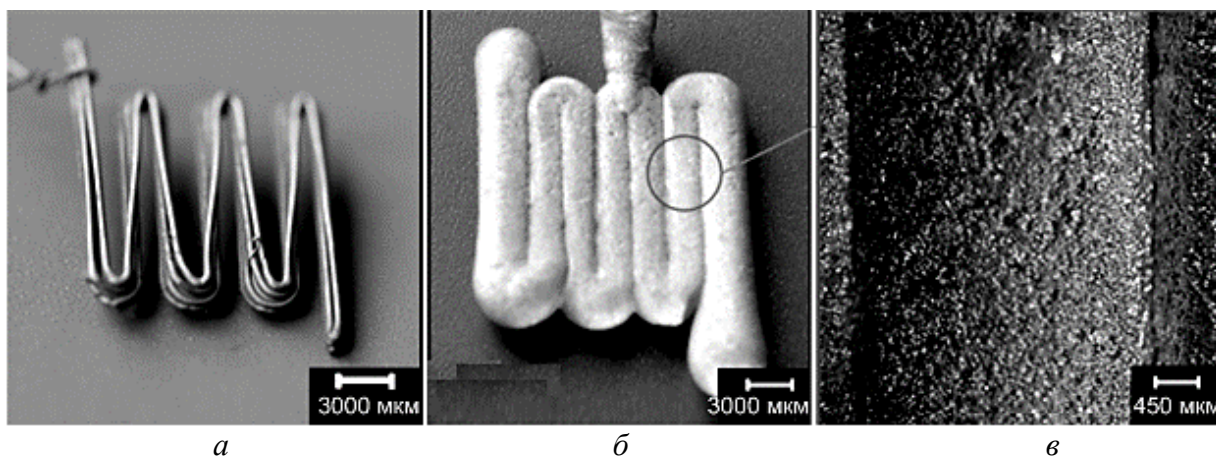


Рисунок 3.17 – Металізована двовірна структура полімерного виробу:
a – після хімічної металізації міддю; *б* – після гальванічного формування покриття на основі міді; *в* – морфологія поверхні покриття

Подібна двоетапна технологія осадження покриттів забезпечує їхню рівномірну товщину на виробах складної конфігурації, високу якість поверхні кінцевих виробів, необхідні функціональні властивості.

Постпроцес металізації полімерних виробів АВ рекомендується для створення одно- та двонаправлених складних тривимірних структур (наприклад, охолоджуючих каналів виробів мікроелектроніки), при отриманні виробів з великою площею поверхні, при створенні виробів з високою тепловіддачею або каталітичних структур (рис. 3.18). Додатковою перевагою технології є суттєве скорочення витрат матеріальних та часових ресурсів порівняно з традиційними технологіями.

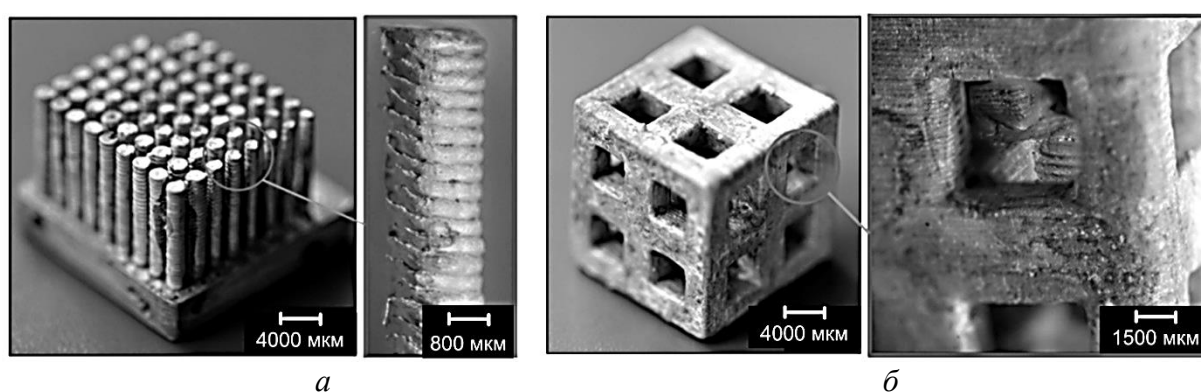


Рисунок 3.18 – Металізовані тривимірні структури полімерних виробів, отриманих адитивним вирощуванням:
a – односпрямована структура; *б* – двоспрямована структура

Процес формування покриттів як варіант постобробки може бути реалізований при отриманні металевих виробів адитивними методами, наприклад, *SLS*.

Досліджено різні методи, схеми та матеріали формування покриттів – хімічне осадження (Ni), гальванічне осадження (Cr), тришарові гальванічні покриття (Cu-Ni-Cr), а також двоетапні процеси осадження покриттів (хімічний Ni + іонно-плазмове покриття на основі нітриду титану TiN як зовнішній шар, тришарове гальванічне покриття Cu-Ni-Cr + іонно-плазмове покриття на основі TiN).

Вибір складу покриттів ґрунтується на існуючій практиці застосування захисно-декоративних та функціональних покриттів.

Як вироби АВ використовували композитні вироби з порошку нержавіючої сталі (Fe – 85,3 %, Cr – 14,3 %, Mn – 0,3 %, Ni – 0,1 %) та олов'янистої бронзи (Cu – 86,6 %) %, Sn – 10,7 %, Pb – 0,6 %, Zn – 05 %.

Товщина хімічних та гальванічних становила ~20 мкм, іонно-плазмових ~3 мкм.

Залежно від складу та методу отримання покриття сприяють підвищенню функціональних властивостей виробів пошарового вирощування – корозійної стійкості (хімічні та гальванічні покриття), твердості та зносостійкості (покриття з використанням іонно-плазмового зовнішнього шару на основі TiN).

Системи покриттів із зовнішнім шаром TiN на проміжній основі з хімічного Ni та тришарового гальванічного покриття Cu-Ni-Cr забезпечують більш ніж 100-кратне підвищення зносостійкості вихідного *SLS*-композиту (рис. 3.19).

Корозійно-захисний та зміцнюючий ефект покриттів, що застосовуються в процесі постобробки, дуже важливий для практичного використання виробів *SLS* як кінцевих виробів, наприклад, форм та інструментального оснащення для лиття пластмас, робоча поверхня яких повинна відповідати підвищеним вимогам щодо зносостійкості, твердості, антифрикційних властивостей. корозійної стійкості.

Серед постпроцесів формування покриттів та надання виробам адитивного виробництва певних функціональних властивостей, підвищення якості поверхні можна відзначити також осадження полімерних покриттів *ультразвуковим розпиленням*. Дана технологія застосовується для зниження

шорсткості *SLS*-виробів із полімерних порошків та надання їм функціональної властивості гідروفобності.

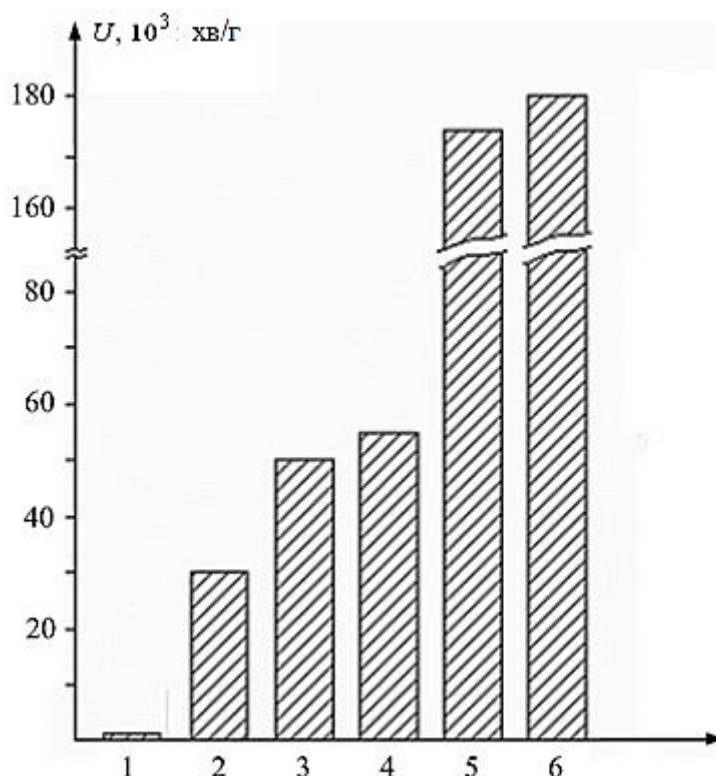


Рисунок 3.19 – Зносостійкість покриттів на *SLS*-виробі:

- 1 – без покриття; 2 – Ni (хімічний метод); 3 – Ni (хімічний метод + термообробка);
4 – Cr (гальванічний метод);
5 – Cu–Ni–Cr + TiN (гальванічний+іонно-плазмовий метод);
6 – Ni + TiN (хімічний + іонно-плазмовий метод)

При ультразвуковому способі розпилення рідина перетворюється на аерозольний стан за рахунок збільшення поверхневої енергії, що досягається шляхом накладання механічних коливань ультразвукової частоти високої інтенсивності.

Досвід застосування методу ультразвукового напилення багат шарових гідروفобних покриттів на основі розчину полівініліденфториду (*PVDF*) на поверхнях неметалічних *SLS*-виробів, наприклад, поліаміду (*PA12*), свідчить про суттєве поліпшення якості поверхні (показник шорсткості R_a знижується від 20 до 5 мкм) та зниження пористості виробу (рис. 3.20).

Вироби АВ з покриттями, сформованими ультразвуковим розпиленням рідини, знаходять досить широке застосування в ряді галузей, у тому числі в медицині, хімічній та радіоелектронній промисловості.

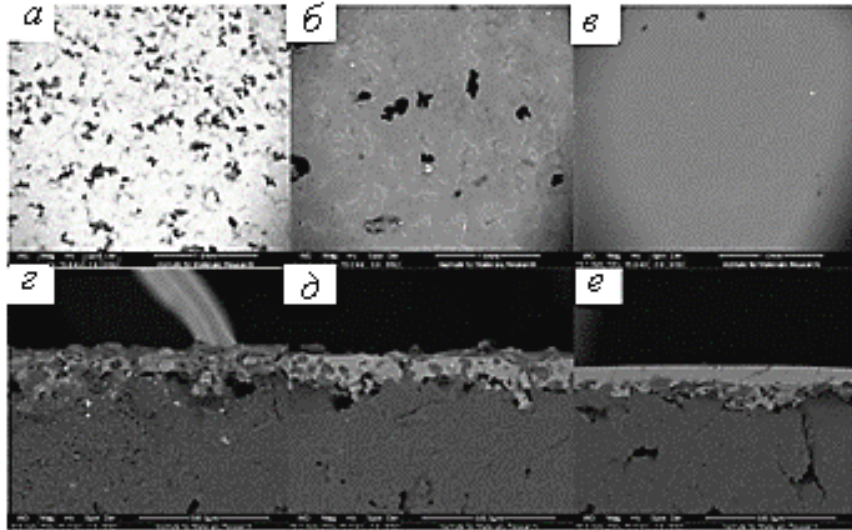


Рисунок 3.20 – Мікроснімки поверхні (а-в) і поперечного перерізу (г-е) SLS-виробу з багатошаровим гідрофобним (10-, 20 і 30-шаровим) покриттям

Питання для самоперевірки

1. В чому полягає поділення-дозування матеріалу як постпроцес адитивного виробництва?
2. Які робочі процеси використовують на етапі поділення-дозування виробів?
3. Які особливості видалення природніх та штучних підтримок виробів *SLA* та *SLS*?
4. Які процеси використовують для видалення руйнівних, виплавлених, розчинних та порошкових підтримок?
5. В чому полягає постпроцес на основі зміни фізико-механічних та хімічних властивостей матеріалу виробу?
6. Яким є призначення інфільтрації як постпроцесу адитивного виробництва?
7. Дайте характеристику механізму ущільнення виробу під час інфільтрації.
8. Як практично здійснюється інфільтрація?
9. Для яких методів інфільтрація є найбільш доцільним постпроцесом і чому?
10. Як реалізуються процеси інфільтрації зануренням та накладенням?

11. Які інфільтрати використовують для АВ-виробів з різних матеріалів?
12. В чому особливість термообробки порошкових середовищ як постпроцесу технологій селективного вибіркового спікання?
13. Які види хіміко-термічної обробки використовують як постпроцеси, для яких видів вихідних матеріалів?
14. В яких випадках доцільним процесом постобробки є термомеханічна обробка гарячим ізостатичним пресуванням?
15. Які види розмірної обробки використовують для підвищення якості виробів в процесах *SLA*, *SLS*, *SLM*? Вкажіть особливості їх практичної реалізації порівняно з традиційними методами.
16. Які задачі в постобробці виробів АВ вирішують за допомогою гібридних процесів на базі поєднання адитивного виробництва заготовки та розмірної механічної обробки?
17. Які методи гібридної обробки є найбільш поширеними в адитивному виробництві?
18. Які методи фінішної постобробки Вам відомі?
19. В чому полягає постпроцес абразивно-екструзійної обробки? Для яких виробів АВ він рекомендований?
20. Надайте характеристику методу нанесення покриття на поверхні виробів адитивного виробництва для підвищення якості кінцевих виробів.
21. За якими ознаками систематизують покриття на виробках адитивного виробництва?
22. Які методи нанесення декоративно-функціонального покриття використовують в різних методах АВ?

4. ЯКІСТЬ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Забезпечення якості виробів високотехнологічних виробництв є важливим завданням, що визначає конкурентоспроможність продукції та її затребуваність на ринку.

Як і в будь-якому сучасному виробництві, основою підвищення економічної ефективності адитивного виробництва є *комплексний підхід до управління якістю продукції*.

Якість виробів є фізичною категорією, обумовленою великою кількістю конструктивно-технологічних та організаційно-технічних факторів, що проявляються на всіх взаємопов'язаних етапах життєвого циклу виробів. Основа взаємозв'язку етапів життєвого циклу виробів полягає в тому, що ці властивості якості закладаються під час проектування, забезпечуються у процесі виготовлення та підтримуються під час експлуатації.

При побудові системи контролю якості в адитивному виробництві необхідно застосування методів контролю якості використовуваних матеріалів, поопераційних методів технологічного контролю, що забезпечують якість та повторюваність технологічних етапів процесу, методів вихідного контролю виробів.

Комплексний контроль якості та його детальне документування особливо актуальні у зв'язку із серійним (дрібносерійним) виробництвом виробів пошарового вирощування, безпека експлуатації яких дуже важлива, наприклад, в автомобільній, авіаційній промисловості, медицині та інших сферах.

4.1. Основні показники якості виробів адитивного виробництва згідно з їх функціональним призначенням та експлуатаційними властивостями

Під якістю продукції як результату діяльності або процесів (деталей, виробів, у тому числі виробів адитивного виробництва) розуміють сукупність властивостей продукції, що належать до її здатності

задовольняти встановлені та передбачувані певні потреби відповідно до її призначення. Ці властивості залежно від вимог споживачів можуть бути різними як за рівнем, так і за поєднанням.

До основних властивостей якості виробів адитивного виробництва належать такі:

- міцність (статична, циклічна, втомна);
- довговічність;
- технологічність;
- взаємозамінність;
- зносостійкість робочих поверхонь;
- корозійна та кавітаційна стійкість;
- спеціальні властивості (відбивна здатність, жаростійкість, електропровідність, герметичність тощо);
- естетичність;
- екологічна чистота.

Зазначені характеристики якості виробів цілеспрямовано відображають їх експлуатаційне призначення. Такі властивості, як технологічність, взаємозамінність та екологічна чистота поряд з експлуатаційним призначенням безпосередньо використовуються на етапі виробництва, формуючи показники техніко-економічної ефективності цього етапу.

Більшість зазначених експлуатаційних властивостей виробів визначається точністю геометричних параметрів робочих поверхонь виробів та фізико-хімічними властивостями поверхневого шару.

Визначення параметрів якості виробів адитивного виробництва не є тривіальним завданням, оскільки якість виробів, отримуваних пошаровим вирощуванням, визначається великою кількістю факторів на різних етапах виробництва, зокрема, фізико-хімічними, механічними властивостями вихідного матеріалу; технологічними параметрами конкретного процесу; характеристиками лазерного випромінювання (для *SLA*, *SLS*, *SLM* та інших методів); режимом пошарового нарощування, складом атмосфери, в якій реалізується процес, та іншими факторами (рис. 4.1).

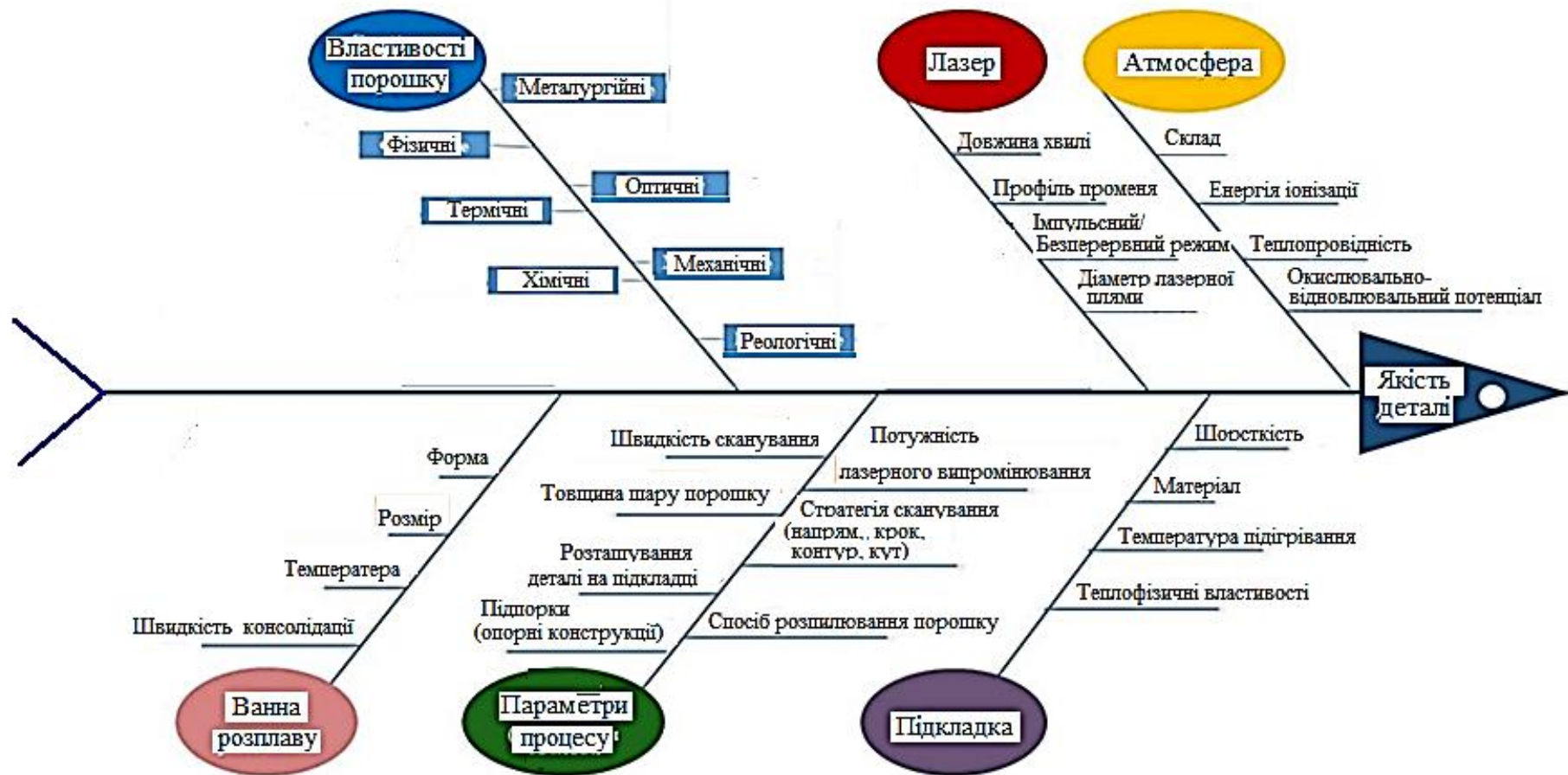


Рисунок 4.1 – Причинно-наслідкова діаграма факторів (діаграма Ісікави), що впливають на якість виробів, отримуваних селективним лазерним сплавленням (SLM)

4.2. Геометрична точність виробів адитивного виробництва

Геометрична точність поверхонь виробу є одією із найважливіших показників якості продукції, отриманої за допомогою адитивних технологій.

Точність геометричних параметрів виробів адитивного виробництва є комплексним поняттям, що включає точність розмірів елементів виробів, їх геометричних форм і взаємного розташування елементів.

Існує досить великий діапазон точності виробів, отримуваних різними технологіями адитивного вирощування. Допуски можуть змінюватися від мікрометрів (і навіть часток мікромметра) до декількох часток міліметра (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Характеристики точності виконання виробів у деяких способах адитивного виробництва

Спосіб адитивного виробництва	Точність виконання, мм
<i>SLA</i>	$\pm (0,001 \div 0,002)$
<i>SLS</i>	$\pm 0,05$
<i>SLM</i>	$\pm 0,04$
<i>FDM</i>	$\pm 0,2$

Серед великої різноманітності методів адитивного виробництва найбільшу точність виробів забезпечує спосіб стереолітографії (*SLA*). Але у багатьох технологіях (*SLS*, *SLM*, *FDM* та інших) проблема підвищення точності є досить актуальною.

Точність виробництва виробів адитивного виробництва визначають аналітичні та технологічні похибки процесів.

Аналітичні похибки складаються з похибок пошарового формоутворення та похибок тріангульованої 3D CAD моделі. *Технологічні похибки* пов'язані зі зміною лінійних і об'ємних характеристик нарощуваного матеріалу в процесі його структурних змін і похибками, що вносяться роботою обладнання.

Підвищення точності в адитивному виробництві пов'язане з використанням автоматичних стратегій управління параметрами процесу в реальному часі. Ефективним методом підвищення точності процесів АВ та

отримуваних виробів є інтеграція адитивної та традиційної «віднімальної» обробки (гібридні технології формоутворення).

Технологічні похибки, пов'язані з особливостями зміни структурного стану матеріалу (наприклад, усадки, спотворень, викликаних залишковими напруженнями), можуть бути компенсовані масштабуванням *3D CAD* моделі на основі детального вивчення впливу параметрів вирощування на структуру та властивості матеріалу виробу.

Проте основним напрямом підвищення точності виробів АВ є застосування різних методів постобробки. При цьому важливим кроком є розробка комплексної стратегії підвищення точності виробів АВ на основі взаємозв'язку параметрів всіх етапів формування кінцевого виробу – від створення *3D CAD* моделі до етапу постобробки.

Дуже важливу роль грає метрологічне забезпечення цього етапу, застосування сучасних вимірювальних систем та установок.

Для вирішення завдань контролю параметрів геометричної точності виробів адитивного виробництва використовують цілий ряд засобів вимірювання, що випускаються серійно. Застосування контактних засобів вимірювання контролю макро- і мікрогеометричних показників точності виготовлення поверхонь виробів часто є неможливим. Це зумовлено складністю форми більшості виробів, характером та величиною нерівностей на поверхнях об'єктів.

Розміри вимірювальних наконечників, що застосовуються в контактних інформаційно-вимірювальних системах, як правило, співставні з характерними параметрами мікрорельєфу, що вносить додаткову похибку до результатів координатних вимірювань. Тому для вирішення поставленої задачі застосовують фотограметричні інформаційно-вимірювальні системи, лазерні тріангуляційні сканери або модифікації зазначених приладів, основними перевагами яких є висока точність, висока швидкість сканування та значний обсяг вимірювальної інформації.

Наприклад, для контролю точності геометричних розмірів виробів, отримуваних різними методами адитивного вирощування, застосовують високоточні оптико-цифрові вимірювальні системи сканування, координатно-вимірювальні системи лазерного сканування, зокрема портативні, що забезпечують вимірювання геометричних параметрів складних поверхонь з високою точністю (± 25 мкм), (рис. 4.2).



a



б

Рисунок 4.2 – Вимірювальні системи, що застосовуються в адитивному виробництві:

- a* – оптико-цифрова система *Iscan II* (*Imetric*, Швейцарія);
- б* – система лазерного сканування *FARO ScanArm* (*Faro*, США)

4.3. Методи контролю якості виробів адитивного виробництва

Особлива роль в адитивному виробництві, як і в традиційних технологічних процесах, належить поверхням (поверхневим шарам) виробів, що утворюють надалі поєднання, що знаходяться під впливом робочих навантажень, дією різноманітних зовнішніх факторів у процесі експлуатації

Під якістю поверхні виробу (аналогічно деталям і заготовкам у традиційному виробництві) розуміють стан його поверхневого шару як результат впливу одного або декількох технологічних методів, що послідовно застосовуються.

У системі класифікації параметрів, що визначають якість поверхневого шару, найбільш важливими для виробів, отримуваних пошаровим вирощуванням, є такі:

- нерівності поверхні (перш за все, шорсткість);
- параметри структури металу (розмір та форма зерен, текстурованість, присутність включень, наявність та густина мікро- та субмікродефектів);
- фазовий та хімічний склад;

- механічні властивості поверхневого шару (мікротвердість);
- величина, тип та характер розподілу залишкових напружень.

Ці характеристики якості поверхні багато в чому визначають експлуатаційні властивості виробів адитивного виробництва – зносостійкість, опір втомі, корозійну стійкість, вібростійкість тощо.

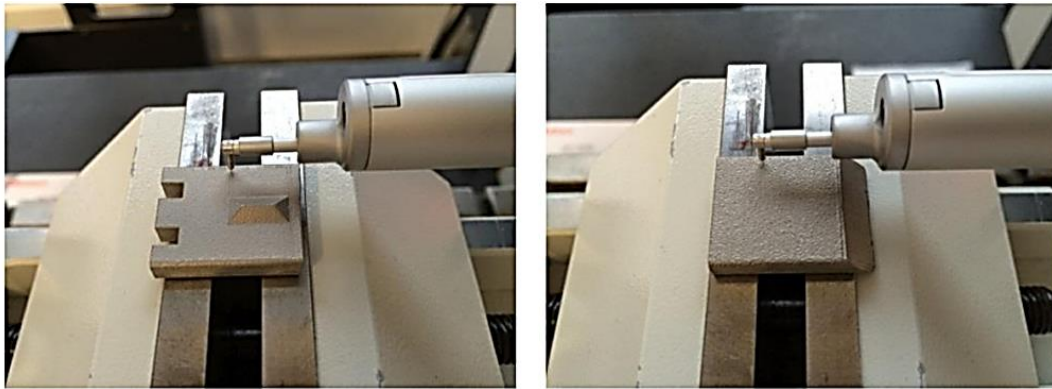
Для визначення параметрів якості поверхневого шару виробів АВ застосовують різні методики – як стандартні, модифіковані, так і оригінальні, адаптовані до особливостей адитивного вирощування.

Найважливішою характеристикою якості поверхні виробів АВ є шорсткість, що істотно впливає на експлуатаційні властивості. При цьому особливі вимоги пред'являються до точності вимірювання та можливості реєстрації різних параметрів шорсткості, що визначають висотні властивості; властивості шорсткості за напрямом довжини профілю; параметрів, пов'язаних із формою нерівностей профілю і т. д. Актуальною проблемою є також вимірювання параметрів шорсткості у важкодоступних ділянках поверхні; контроль шорсткості поверхонь, по-різному орієнтованих відносно вектора нарощування.

Зазвичай вимірювання параметрів шорсткості проводиться профілометрами, профілометрами-профілографами з високою роздільною здатністю та малими значеннями похибки вимірювання (рис. 4.3).

Дані значень шорсткості поверхні виробів адитивного виробництва, отримані різними авторами, мають суттєвий розкид, пов'язаний із впливом на цей показник багатьох факторів – методики та точності вимірювання, використовуваного засобу вимірювання, фізичними особливостями реалізації процесу АВ у різних установках, присутністю та видом постобробки тощо.

Наприклад, на рис. 4.4 наведено дані щодо шорсткості поверхні для різних методів адитивного виробництва та застосовуваних матеріалів. У табл. 4.2 наведено узагальнені значення шорсткості поверхні виробів для деяких методів адитивного вирощування та після постобробки.



a



б

Рисунок 4.3 – Контроль шорсткості виробів, отриманих адитивним вирощуванням:

a – контроль *SLS*-виробів профілометром;

б – застосування профілометра-профілографа *Surtronic 3+ (Taylor-Hobson)* з діапазоном вимірювання за параметром R_a $99,9 \div 0,01$ мкм, роздільною здатністю $0,01$ мкм, похибкою вимірювання $\pm 5\%$

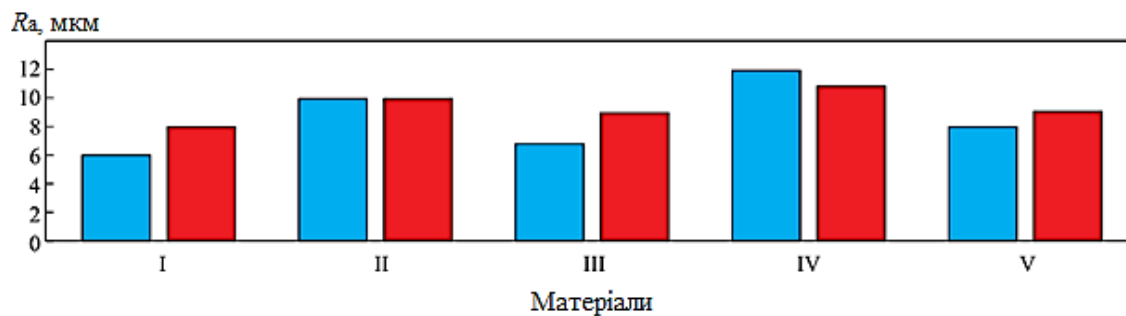


Рисунок 4.4 – Середні значення параметра шорсткості R_a поверхні виробів, що виготовляються з різних матеріалів на установках *3D* друку компаній *SLM Solution* (■) та *EOS* (■) при товщині шару, що спікається $\delta = 50$ мкм:

I – Al-сплави; II – Co-сплави; III – Ni-сплави; IV – Ti-сплави;
V – інструментальна та нержавіюча сталь

Таблиця 4.2 – Шорсткість поверхні виробів адитивного виробництва

Процес адитивного виробництва	Шорсткість поверхні виробів адитивного виробництва (без застосування постпроцесу) R_a , мкм	Шорсткість поверхні після застосування постобробки (найкращі результати) R_a , мкм
<i>SLA</i>	2÷40	0,64
<i>SLS</i>	5÷35	0,8
<i>FDM</i>	9÷40	0,3
<i>3DP</i>	12÷27	–
<i>LOM</i>	6÷27	–
<i>MJM</i>	3÷30	–

До важливих показників якості виробів адитивного виробництва, зокрема якості поверхневого шару, належать структурні фактори, насамперед, наявність технологічних дефектів у матеріалі виробу, природа яких визначається характером процесу.

Наприклад, до типових дефектів, що спостерігаються у виробах з металевих матеріалів (*SLS*, *SLM*), відносять відсутність сплавлення (розшарування), усадкову пористість, газову пористість, мікротріщини, термічні напруження, короблення та «випуклість» (рис. 4.5).

Типовими дефектами полімерних та композитних виробів АВ можуть бути низька міжшарова адгезія, коробління, відсутність шару, наявність мікротріщин, формування мікро- та макропористості (рис. 4.6).

Для контролю якості структурних дефектів можуть бути застосовані традиційні методи оптичної та електронної мікроскопії (трансмісійної та скануючої), рентгенівської дифракції, мікрорентгеноспектрального аналізу тощо.

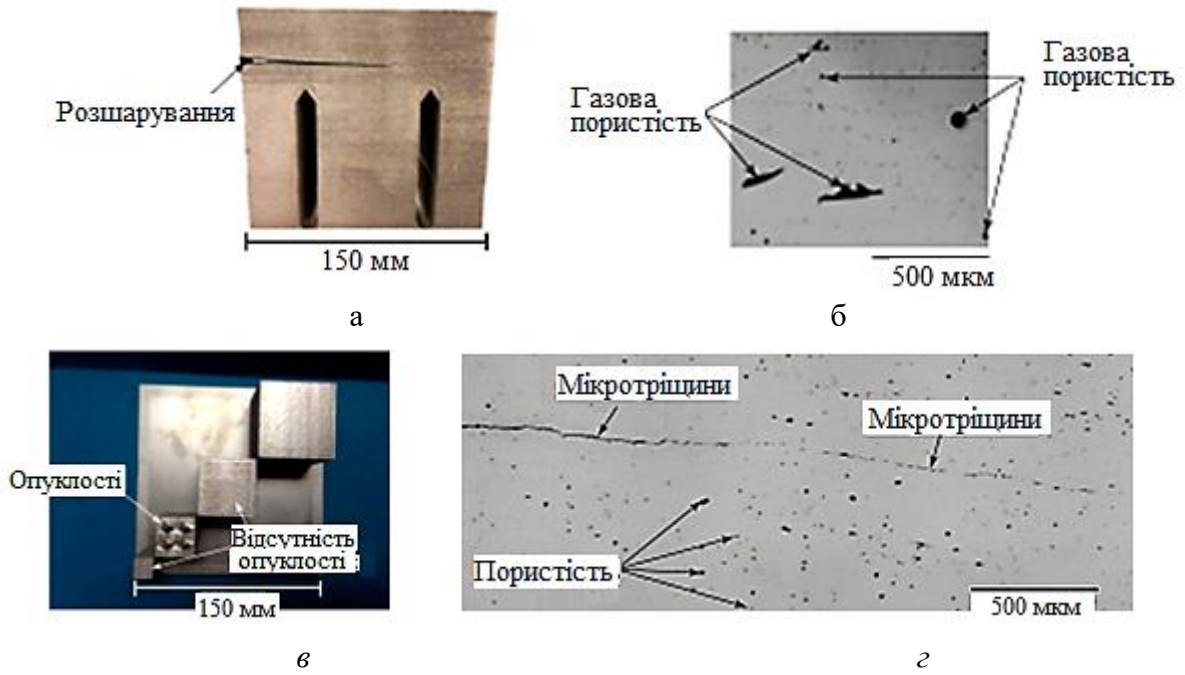


Рисунок 4.5 – Типи дефектів у металевих АВ-виробах:
а – відсутність сплавлення; *б* – технологічна (газова) пористість;
в – опуклості; *г* – мікротріщини

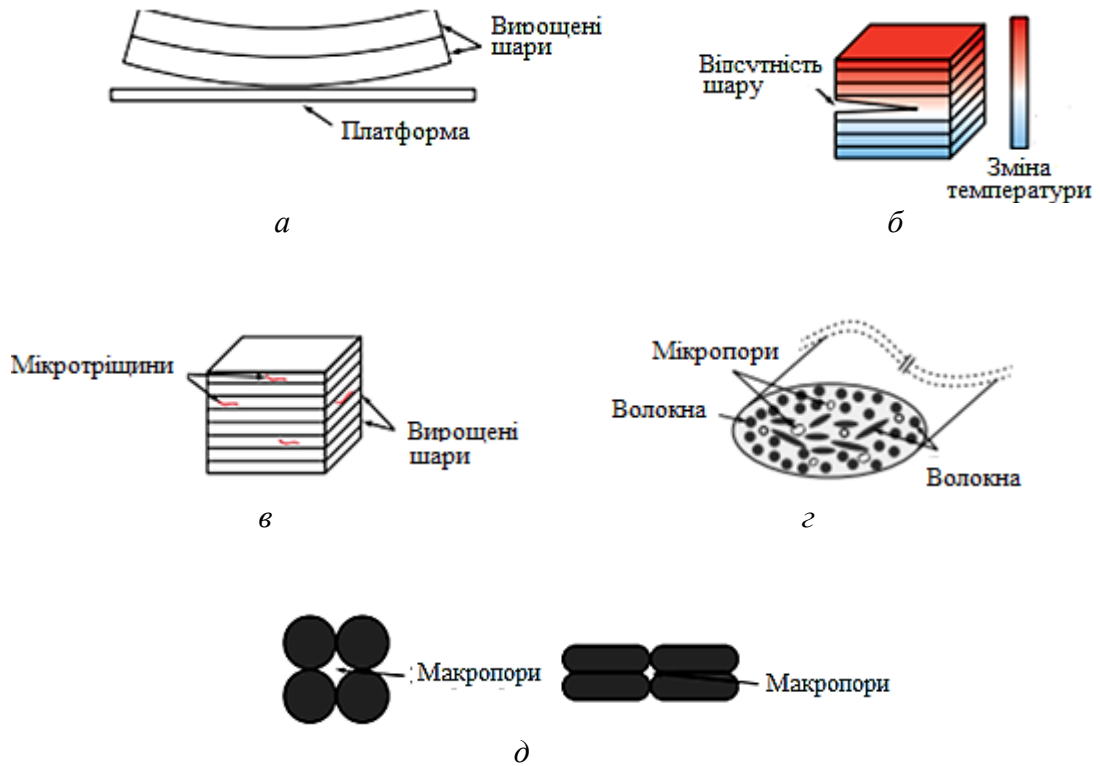


Рисунок 4.6 – Типові дефекти в полімерних та композитних виробах АВ:
а – коробління; *б* – відсутність шару; *в* – мікротріщини; *г* – мікропори;
д – макропори

Проте застосування зазначених методів не є достатнім для аналізу складних об'єктів адитивного виробництва. Це пов'язано з наступними чинниками: зазначені методи носять руйнівний характер, що негативним моментом з урахуванням високої вартості витратних матеріалів; деякі із зазначених методів вимагають трудомісткого та тривалого етапу препарування зразків для досліджень; застосування даних методів для дослідження структури об'ємних ділянок виробів часто є проблематичним; підготовка зразків для тестування вносить артефакти у структуру та властивості поверхневих шарів виробів.

У зв'язку із зазначеними недоліками, а також особливою важливістю контролю якості виробів адитивного виробництва необхідна розробка нових та модифікація існуючих методів аналізу структурного стану з урахуванням специфіки формування виробів пошаровим вирощуванням.

Найбільш перспективними методами неруйнівного контролю виробів АВ, що дозволяють виявити як поверхневі, так і внутрішні дефекти структури і навіть виміряти геометричні параметри з високою точністю, є ультразвукова візуалізація, нейтронна томографія, рентгенівська комп'ютерна томографія тощо.

Деякі з цих методів розглядаються далі.

- ***Рентгенівська комп'ютерна томографія.***

Достатньо затребуваним методом контролю якості в адитивному виробництві, що отримав розвиток для дослідження геометрично складних виробів з внутрішніми каналами, гратчастими структурами, прихованими порожнинами та іншими внутрішніми елементами є рентгенівська комп'ютерна томографія (РКТ, *XRCT*). Метод успішно інтегрований у процеси пошарового вирощування та використовується сьогодні як основний інструмент контролю якості виробів адитивного виробництва (рис. 4.7, 4.8).

На рис. 4.7 наведено порівняльну характеристику методів неруйнівного контролю, що використовуються для виявлення дефектів у виробках АВ, а також для вимірювань. Класифікація представлена відповідно до місця розташування дефектів і роздільної здатності. Наприклад, оптичні методи можуть забезпечити досить високу роздільну здатність, але можливий контроль лише поверхні (поверхневого шару). Застосування вихрострумів і ультразвукових методів можливе для виявлення дефектів, що неглибоко залягають в об'ємі, проте роздільна

здатність знаходиться в міліметровому діапазоні. Таким чином, оптимальним методом неруйнівного контролю об'єму виробів складної геометрії є рентгенівська комп'ютерна томографія, що має роздільну здатність від мікрметра до міліметра, а в деяких випадках навіть субмікронні рівні.

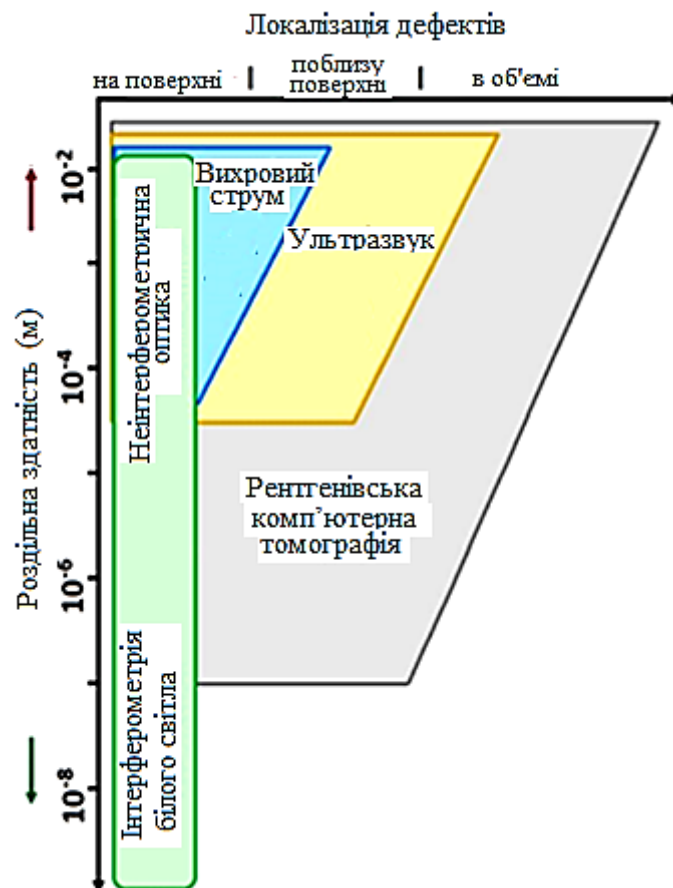


Рисунок 4.7 – Порівняння деяких існуючих методів неруйнівного контролю (залежність розташування дефектів від роздільної здатності)

В основі методу рентгенівської комп'ютерної томографії лежить оцінка густини матеріалу за інтенсивністю випромінювання, що проходить через об'єкт і потрапляє на детектор. Метод дає можливість створити тривимірну модель об'єкта, що сканується, з подальшим отриманням будь-яких його перерізів.

Висока роздільна здатність РКТ забезпечується завдяки використанню мікрофокусних джерел рентгенівського випромінювання, а також високочутливих детекторів рентгенівського випромінювання.

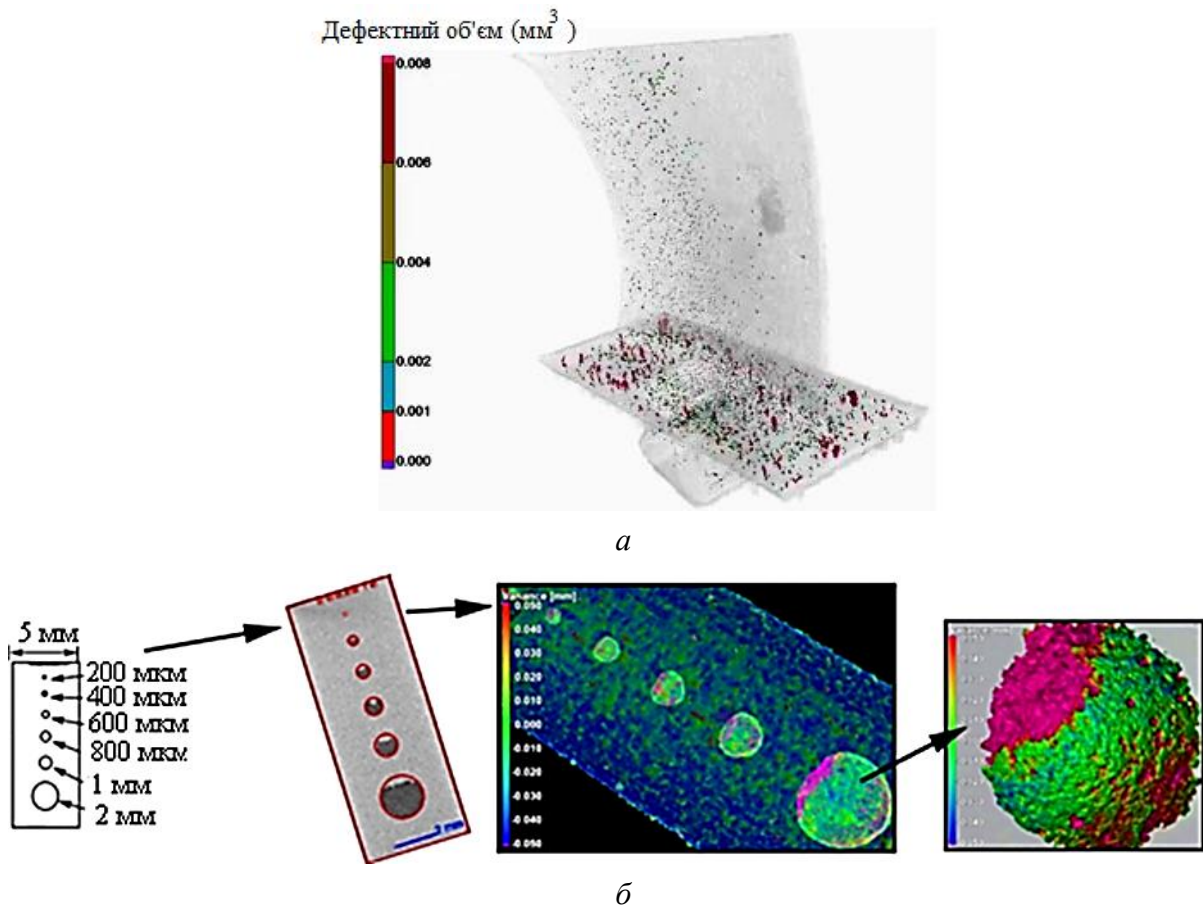


Рисунок 4.8 – Застосування РКТ для контролю якості виробів АВ:

- a* – аналіз пористості турбінної лопатки з сплаву Ti-6Al-4V;
- б* – РКТ-дослідження виробу з нікель-хромового сплаву (інконель 625) з візуалізацією відхилення геометричних розмірів виробу порівняно з номінальним розміром, тобто щодо базової/номінальної геометрії 3D CAD

На основі тривимірного зображення при рентгенівському просвічуванні можливе отримання точних розмірів як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь адитивного виробництва виробів, визначення геометрії внутрішніх поверхонь і каналів, отримання об'ємної картини розташування дефектів – пустот, пор, тріщин, включень тощо.

Застосування рентгенівської томографії є досить ефективним для контролю якості вихідних матеріалів, які застосовуються в адитивному виробництві, наприклад порошкових середовищ (рис. 4.9), що є дуже важливим для забезпечення системного контролю якості виробів, одержуваних пошаровим вирощуванням, оскільки дефекти вихідного матеріалу порошків можуть бути потенційно причиною дефектів кінцевих виробів. Наприклад, агломерація зерен порошку, їх неправильна форма сприяють появі пористості SLS-виробу. Наявність каналів, порожнин або

мікроструктурна неоднорідність у порошковому матеріалі можуть стати причиною розвитку тріщин у виробі.

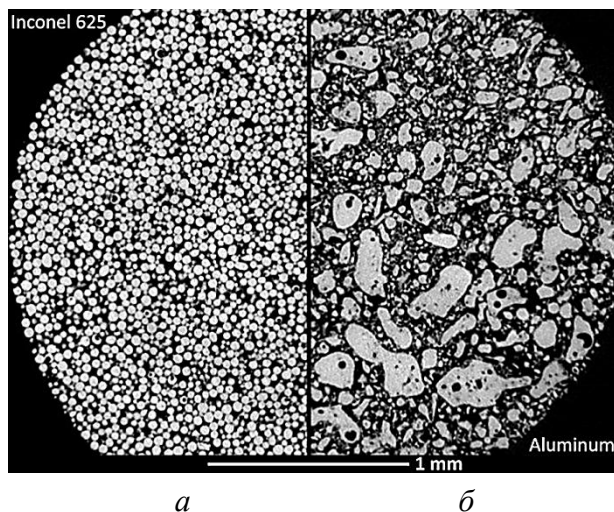


Рисунок 4.9 – РКТ-знімки різних порошків для SLS-процесу з візуалізацією їх дефектності:

a – нікель-хромовий сплав (*Inconel 625*); *б* – порошок алюмінієвого сплаву

На основі даних комп'ютерної томографії можливе також проведення віртуальних випробувань, тобто моделювання поведінки виробу в умовах, наближених до реальних при експлуатації; отримання інформації про зони потенційного руйнування та граничні навантаження по всьому об'єму виробу. Комп'ютерна рентгенівська томографія застосовується для порівняння кінцевого виробу з даними CAD, що забезпечує оптимізацію процесу для поліпшення проектування та виробництва деталей АВ (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Ітеративний процес оптимізації для проектування та виробництва деталей АВ на основі використання даних РКТ

Статистичний аналіз дефектів за результатами РКТ дозволяє провести математичне моделювання впливу вхідних параметрів 3D друку (наприклад, потужності лазера, швидкості побудови виробу, товщини шару тощо) на кінцеві характеристики виробу. Інтеграція методу РКТ у процес адитивного виробництва сприяє реалізації зворотного або реверсного інжинірингу.

Особлива роль контролю якості виробів АВ відводиться **неруйнівним методам контролю (моніторингу) в режимі реального часу**, включеним безпосередньо до технологічного процесу пошарового вирощування виробів (контроль *in situ*), що забезпечує оперативний контроль у процесі адитивного вирощування.

Моніторинг *in situ* є надзвичайно важливим для адитивного виробництва, оскільки вартість вихідних матеріалів залишається досить високою, як і вартість, а також тривалість етапів постобробки. Виявлення потенційних проблем на ранніх етапах виготовлення виробів може мінімізувати зазначені втрати. Подібний підхід вписується у загальну стратегію системного підходу контролю якості виробів АВ.

До подібних методів моніторингу процесів адитивного виробництва можна віднести методи **високошвидкісної зйомки процесів (CCD-камери)**, що дозволяє контролювати швидкоплинні процеси з високою роздільною здатністю; **пірометрію**, що забезпечує вимірювання усередненої температури невеликої зони об'єкта; **інфрачервону термографію (ІЧТ, TIR)**, що дозволяє аналізувати термоцикл зони обробки.

Найбільш ефективним методом моніторингу, активного контролю ряду технологій АВ (*SLS, SLM*) є метод інфрачервоної термографії, що дозволяє візуалізувати розподіл температури на поверхні виробу пошарово і, в результаті, забезпечує контроль історії формоутворення виробів пошаровим нарощуванням, а також динаміки процесів з метою управління якістю виробів.

Основний інструмент дослідження у методі термографії – ІЧ-камера, що працює за принципом реєстрації ближнього інфрачервоного випромінювання (тобто електромагнітного випромінювання із довжиною хвилі 0,9÷14 мкм) у зоні лазерної обробки.

Кількість енергії випромінювання кожної довжини хвилі є функцією температури локального ділянки об'єкта. «Пікселі» в тепловій камері фактично є окремими датчиками, розташованими у фокальній площині,

кожен з яких збирає електромагнітне випромінювання від локальних ділянок і, таким чином, формує термограму – двомірний розподіл температури на поверхні виробу.

Методи інфрачервоної термографії, що ґрунтуються на реєстрації теплових полів під час процесів, відіграють найважливішу роль для контролю SLS, SLM-технологій, які є термічними процесами, де тепловий фактор є визначальним у структуроутворенні виробів. Температура об'єкта є ключовим параметром у цих процесах та залежить від основних параметрів обробки. Інформація про динаміку температури поверхні виробу протягом усього термічного циклу лазерної обробки має великий практичний інтерес, оскільки відсутність оперативного контролю в селективному лазерному плавленні є однією із головних перешкод на шляху його широкого промислового застосування.

Ця методика відноситься до найпрогресивніших методів активного контролю в адитивному виробництві, за результатами якого здійснюється вплив на технологічний процес. Методи активного контролю спрямовані на профілактику браку, тобто забезпечення необхідної якості (точності) розмірних та інших параметрів виробів у процесі їх отримання.

ІЧ-камери, вбудовані у загальну схему установок адитивного виробництва (рис. 4.11), забезпечують безперервне вимірювання температури в локальних ділянках в процесі адитивного пошарового нарощування, контроль теплових полів усередині кожного шару, а також виявлення різних дефектів порушення суцільності системи, зокрема пор, мікротріщин і порушень геометрії.

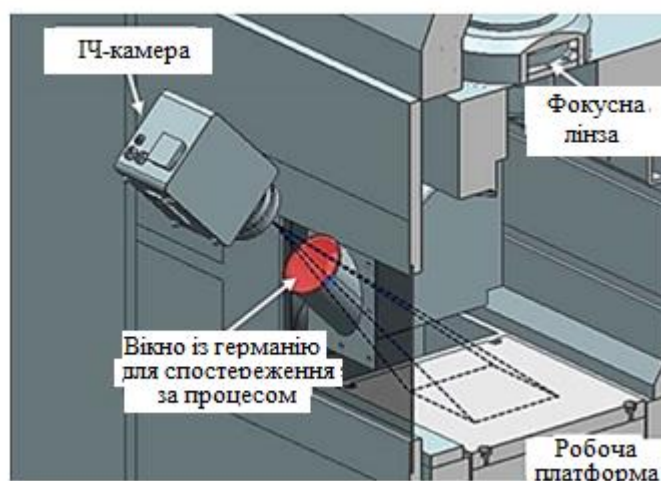


Рисунок 4.11 – Один из варіантів інтеграції ІЧ-установок в схему SLM-процесу

Таким чином, метод ІЧТ дозволяє контролювати динаміку процесів спікання дисперсних середовищ, особливості плавлення та затвердіння розплавів (*SLS, SLM, FDM*), забезпечує виявлення та запобігання утворенню найбільш небезпечних дефектів виробів у процесі пошарового вирощування. На базі даних інфрачервоної термографії можливе прогнозування особливостей формування мікроструктури, які в результаті визначають функціональні властивості виробів (рис. 4.12).

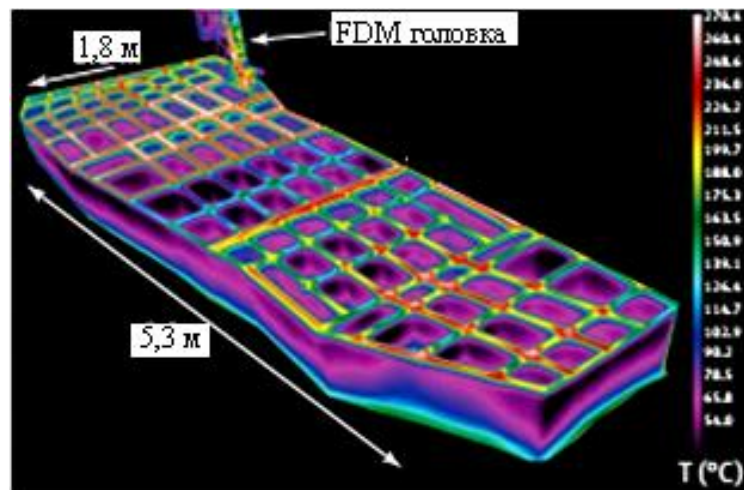


Рисунок 4.12 – Дані розподілення температурних полів для композитних АВ-виробів:

ІЧ-термограма для *ABS/CF*-полімеру, *FDM* (модель для виготовлення тримера пасажирського літака Boeing 777X, розміри 5,3x1,8x1,2 м)

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні показники якості виробів адитивного виробництва згідно з їх функціональним призначенням та експлуатаційними властивостями.
2. Якими є характеристики точності виконання виробів у різних методах АВ?
3. Які методи підвищення точності виробів адитивного виробництва є перспективними?
4. Вкажіть основні параметри якості поверхневого шару виробів АВ.
5. Які методи та прилади використовують для визначення шорсткості виробів, виготовлених пошаровим вирощуванням?
6. Надайте порівняльну характеристику шорсткості поверхні виробів у

різних методах АВ без використання постпроцесів та з їх присутністю.

7. Які основні типи технологічних структурних дефектів виробів АВ та причини їх утворення?
8. Які основні методи використовують для контролю якості виробів адитивного виробництва?
9. Що розуміють під методами контролю якості виробів АВ *in situ*?
Наведіть приклади.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gibson I. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing / I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker. – New York : Springer, 2015. – 498 p.
2. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – Москва : Техносфера, 2016. – 656 с.
3. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения / И. В. Шишковский. – СПб. : Питер, 2016. – 400 с.
4. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – СПб. : Изд-во политехнического университета, 2013. – 222 с.
5. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с.
6. Kumbhar N. N. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies : A Review / N. N. Kumbhar, A. V. Mulya // J. Inst. Eng. India Ser. C, 2018. – V. 99, N 4. – P. 481-487.
7. Srivatsan T. S. Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications / T. S. Srivatsan, T. S. Sudarshan. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 460 p.
8. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие для студ. выс. учеб. заведений, которые обуч. по специальности «Технология машиностроения» / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок и др. ; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с.
9. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения : ГОСТ Р 57558-2017 / ISO / ASTM 52900:2015 (Additive manufacturing – General principles – Terminology, IDT). – М. : Стандартинформ, 2018. – 16 с.
10. Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник для высш. учебн. заведений / А. И. Грабченко, В. А. Залога,

Ю. Н. Внуков и др.; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2017. – 451 с.

11. Jiang J. Support Structures for Additive Manufacturing : A Review / J. Jiang, X. Xu, J. Stringer // J. Manuf. Mater. Process, 2018. – V. 2, N 64.

12. Ni F. Fabrication of water-soluble poly (vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application / F. Ni, G. Wang, H. Zhao // J. Appl. Polym. Sci., 2017. – V. 134, N 24.

13. Hussein A. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing / A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, P. Young // J. Mater. Process. Technol, 2013. – V. 213. – P. 1019-1026.

14. Vaidya R. Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint / R. Vaidya, S. Anand // Procedia Manuf., 2016. – V. 5. – P. 1043-1059.

15. Vanek J. Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication / J. Vanek, J. A. G. Galicia, B. Benes // Comput. Graph. Forum, 2014. – V. 33. – P. 117-125.

16. Kumar S. Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts / S. Kumar, J. P. Kruth // Materials & Design, 2007. – V. 28. – P. 400-407.

17. Порошковая металлургия. Термины и определения : ГОСТ 17359-82. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 18 с.

18. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии : учеб. для вузов : в 2 т. Т 2. / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : МИСиС, 2002. – 320 с.

19. German R. M. Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing / R. M. German. – Princeton, USA : Metal Powder Industries Federation, 2005. – 540 p.

20. Гиршов В. Л. Современные технологии в порошковой металлургии : учеб. пособие / В. Л. Гиршов, С. А. Котов, В. Н. Цеменко. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 385 с.

21. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: монография / Товажнянский Л. Л., Грабченко А. И., Чернышов С. И. и др.; под ред. Л. Л. Товажнянского и А. И. Грабченко. – Харьков : ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.

22. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: учеб. пособ. / Везуб Н. В., Весткемпер Э., Внуков Ю.Н. и др.; под ред. А. И. Грабченко. – Х. : ХГПУ, 1999. – 436 с.
23. Duck J. Infiltration as post-processing of laser sintered metal parts / J. Duck, F. Niebling, T. Neesse, A. Otto // Powder Technology, 2004. – N 145 (1). – P. 62-68.
24. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов : В 2т. Т.1 / А. Г. Косторнов. – К. : Наук. думка, 2002. – 570 с.
25. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review / W. E Frazier // J. Mater. Eng. Perform, 2014. – V. 23, N 6. – P. 1917-1928.
26. Post Processing Methods : Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion. ASTM F3301 – 18a. Standard for Additive Manufacturing : ASTM, 2018 – 3 p.
27. Процессы изостатического прессования / Под ред. Джеймса П. Дж. Пер. с англ. / Под ред. Папинова И. И. и Пахомова Я. Д. – М. : Металлургия, 1990. – 192 с.
28. Hashmi S. Comprehensive Materials Processing : 13 volume set V.3 / S. Hashmi, G. F. Batalha, C. V. Tyne, B. S. Yilbas . – Amsterdam : Elsevier, 2014. – 377 p.
29. Береснев А. Г. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства / А. Г. Береснев, И. М. Разумовский // Аддитивные технологии, 2017. – №4. – С. 44-48.
30. Huang S. Microstructure and Porous Defects of a Spray-Formed and Hot Worked 7000 Aluminum Alloy / S. Huang, Z. Li, B. Xiong, Y. Zhang, X. Li, H. Liu , H. Yan , L. Yan // Materials Science Forum, 2017. – V. 879. – P. 1778-1782.
31. Morokoshi S. Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Materials Prepared by Additive Manufacturing Technology and HIP Process / S. Morokoshi, H. Masao, H. Yagura, Y. Yamamoto, T. Fujikawa // Proc. 11th Int. Conf. on Hot Isostatic Pressing. – Stockholm, 2014. – P. 398–404.
32. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review / W. E. Frazier // J. Mater. Eng. Perform., 2014. – V. 23, N. 6. – P. 1917-1928.
33. Ильющенко А. Ф. История и современное состояние аддитивных технологий в Беларуси, порошки металлов и сплавов для них

/ А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Космична наука и технология, 2017. – Т. 23, № 4. – С. 33-45.

34. Основы теории резания материалов: учебник для высш. учебн. заведений / Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И., Доброскок В. Л., Залого В. А., Новоселов Ю. К., Якубов Ф. Я.; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

35. Lauwers B. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // Manufacturing Technology, 2014. – V. 63, N 2. – P. 561-583.

36. Sealy M. P. Hybrid processes in additive manufacturing / M. P. Sealy, G. Madireddy, R. E. Williams, P. Rao, M. Toursangsaraki // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018. – V. 140, P. 060801:1-13.

37. Кузнецов А. С. Технологии гибридного формообразования / А. С. Кузнецов // Аддитивные технологии, 2018. – №4. – С. 34-42.

38. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса: монография / В. А. Левко. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмический ун-т, 2007. – 228 с.

39. Bremerstein T. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results / T. Bremerstein, A. Potthoff, A. Michaelis, C. Schmiedel // Wear , 2015. – V. 342-342, N 15. – P. 44-51.

40. Williams R. E. Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes / R. E. Williams, V. L. Melton // Rapid Prototyping Journal, 1998. – V. 4 , N 2. – P. 56 - 67.

41. Савин Д. И. Абразивно-экструзионная обработка аддитивных моделей / Д. И. Савин, В. А. Левко // Решетневские чтения: Технология и мехатроника в машиностроении. – 2016, С. 575-577.

42. Kumar R. A review on Chemical Processes for Plastics substrates used in engineering industries / R. Kumar // International Journal of Chem. Tech. Research, 2016. – V. 9, N. 7. – P. 354-365.

43. Севидова Е. К. Исследование коррозионно-защитного эффекта гальванических покрытий на объектах RP-технологий / Е. К. Севидова, В. Н. Цюрюпа // Электронная обработка материалов, 2009. – № 2. – С. 25–28.

44. Севидова Е. К. Влияние покрытий на поверхностную прочность RP-изделий / Е. К. Севидова, Л. И. Пупань, В. Н. Цюрюпа // Электронная обработка материалов, 2008. – № 5. – С. 30–33.

45. Любимов В. В. Технология синтеза многослойных систем на полимерных основаниях, полученных методом быстрого прототипирования / В. В. Любимов, М. С. Саломатников // Известия ТулГУ. Технические науки, 2013. – Вып. 9. – С. 336-344.
46. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору ГОСТ 9.303-84. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 45 с.
47. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. – М. : Мир, 2000. – 516 с.
48. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Термины и определения : ГОСТ 9.072-2017 . – М. : Стандартинформ, 2017. – 36 с.
- 49 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения : ГОСТ 9.008-82 – М. : Стандартинформ, 1982. – 22 с.
50. Slegers S. Surface Roughness Reduction of Additive Manufactured Products by Applying a Functional Coating Using Ultrasonic Spray Coating / S. Slegers, M. Linzas, J. D. Haen // Coatings, 2017, 7, 208.
51. Управление качеством и обеспечение качества: часть 1 Стандарты по управлению качеством и обеспечению качества ДСТУ ISO 9000-1-95. – К. : Госстандарт Украины, 1995. – 22 с.
52. Жирнов И. В. Информационно-измерительная система для контроля геометрических параметров зоны селективного лазерного плавления на основе морфологической обработки термоизображений : Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / И. В. Жирнов. – М. : Моск. гос. технол. ун-т Станкин. – 2017. – 215 с.
53. Ding D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 81(1-4). – P. 465–481.
54. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
55. Сухов Д. И. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства / Д. И. Сухов, С. В. Неруш, С. В. Беляков, П. Б. Мазалов

// Известия высших учебных заведений. – М. : Машиностроение, 2017. – т. 690, № 9. – С. 73-84.

56. Hassen A. A. Additive Manufacturing : The rise of a technology and the need for quality control and inspection techniques / A. A. Hassen, M. M. Kirka // Materials Evaluation, 2018. – V. 76, N 4. – P. 439-453.

57. Lu Q. Y. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring / Q. Y. Lu, C. H. Wong // Virtual and Physical Prototyping, 2018. – V. 13, N. 2. – P. 39-48.

58. Villarraga-Gómez H. The role of computed tomography in additive manufacturing / H. Villarraga-Gómez, C. M. Peitsch, A. Ramsey, S. T. Smith // American Society for Precision Engineering : Topical Meeting. – Berkeley, California, USA, 2018. – V. 69. – P. 201-209.

59. Krauss H. Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process / H. Krauss, C. Eschey, V. Zaeh // 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium: proceedings of the conference. – The University of Texas , 2012. – P. 999-1014.

60. Порошкові титанові сплави для адитивних технологій: структура, властивості, моделювання: монографія / О. В. Овчинников, З. А. Дурягіна, Т. Є. Романова та ін. – Київ : Наукова думка, 2021. – 196 с.

Навчальне видання

ПУПАНЬ Лариса Іванівна

ПОСТПРОЦЕСИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчальний посібник

для студентів спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Роботу до видання рекомендував Олександр ШЕЛКОВИЙ

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 10.

Підп. до друку 03.03.2023 р. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 4,3.

Видавничий центр НТУ «ХП», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія