

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Пухальська Г.В.
ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни
«Сучасні технології в машинобудуванні»

для студентів спеціальності
131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології машинобудування»
усіх форм навчання

2023

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “Сучасні технології в машинобудуванні” для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми Технології машинобудування усіх форм навчання / Укл. доц. Пухальська Г.В., – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023 – 58 с.

Укладач: Пухальська Г.В., к.т.н., доцент каф. ТМБ

Рецензент: Козлова О.Б, к.т.н., доцент каф. ТМБ

Відповідальний за
випуск Дядя С.І., к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено на засіданні кафедри
«Технологія машинобудування»
Протокол № 2 від 12 вересня 2023 р.

Рекомендовано до видання НМК МФ
Протокол № 2 від 14.09.2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ІСТОРИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОЯВИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, КЛАСИФІКАЦІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ПОСТ-ОБРОБКА	4
1.1 Історія виникнення та розвитку	4
1.2 Класифікація технологій 3D-друку	5
1.3 Матеріали для 3D-друку та аналіз методів пост-обробки	14
1.4 Основні сфери застосування	23
2 НАНОТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ	24
2.1 Основні поняття і визначення	24
2.2 Структура і властивості наноструктурних матеріалів	27
2.3 Фізичні властивості	29
2.4 Хімічні властивості	31
2.5 Механічні властивості	32
2.6 Наноструктурні конструкційні матеріали	35
2.7 Нанотехнології в машинобудуванні	36
2.8 Основні області застосування наноматеріалів і нанотехнологій	37
3 ЛАЗЕРНА ОБРОБКА	39
3.1 Основні фізичні процеси лазерних технологій	40
3.2 Технологічні процеси лазерної обробки матеріалів	42
3.2.1 Лазерне різання	42
3.2.2 Лазерне зварювання	44
3.2.3 Лазерне свердління	49
3.2.4 Лазерна поверхнева обробка	50
3.2.5 Лазерне маркування	51
4 ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	56

ВСТУП

Адитивні технології - одна з форм технологій виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом послідовного накладання одного шару матеріалу на інший (друку, спікання). Для друку використовується 3D-принтер, який забезпечує створення фізичного об'єкта на основі цифрової 3D-моделі шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу. 3D-друк знайшов широке застосування в медицині, освіті, машинобудівній, авіаційній, харчовій промисловості та інших сферах діяльності людини. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності і швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції.

1 ІСТОРИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОЯВИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, КЛАСИФІКАЦІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ПОСТ-ОБРОБКА

1.1 Історія виникнення та розвитку

3D-друк радикально відрізняється від традиційного метода виробництва, коли матеріал видаляється з заготовки. Метод на основі 3D-друку дозволяє пошарово створювати деталь без заготовки, маючи тільки в наявності 3D-модель одержуваної деталі. Це принципова відмінність від будь-якої іншої існуючої традиційної технології виробництва.

Перші технології 3D-друку з'явилися в кінці 1980-х років. Їх називали швидке прототипування (Rapid Prototyping). Це тому, що дані процеси спочатку були задумані, як швидкий і більш ефективний метод для створення прототипів. Найперший патент заявка на технологію RP була подана Кодама, Японія, у травні 1980 року.

У 1986 році, був виданий перший патент на апарат стереолітографії (SLA). Цей патент належав Чарльзу Халл, який вперше винайшов свою машину SLA в 1983 році. Халл став співзасновником компанії «3D систем». Ця корпорація – одна з

найбільших і плодовитих організацій, що працюють в 3D поліграфічному секторі до сьогоднішнього дня.

У 1987 році, Карл Декард, який працював в Техаському університеті, подав патент в США на процес селективного лазерного спікання (SLS) швидкого прототипування. Цей патент був випущений в 1989 році і SLS пізніше був ліцензований DTM Inc, яка пізніше була придбана «3D Systems». У тому ж 1989 року Скотт Крамп, співзасновник компанії Stratasys Inc. подав патент на «моделювання методом наплавлення» (FDM). Патент на технологію FDM був виданий компанії Stratasys в 1992 році.

У 2000 році була впроваджена технологія «Селективного лазерного спікання» (SLM). Хон Корпорація та Sciaky Inc були першопрохідцями в цій технології. Відправною точкою для будь-якого 3D-друкування є 3D цифрова модель, яку можна створити, використовуючи різноманітне програмне забезпечення, наприклад 3D CAD системи. Етап STL, готова модель нарізається на шари в окремій програмі, тим самим перетворений файл читається на 3D-принтері. Матеріал обробляється на 3D-принтері, після цього нашаровується, згідно з конструкцією деталі та процесу печаті. Існує ряд різних типів технологій 3D-друку, кожен процес відрізняється матеріалами, способом створення кінцевого об'єкта. Функціональні пластмаси, метали, кераміка і пісок, тепер все це зазвичай використовується для промислового прототипування. Пластмаса в даний час широко використовуваний матеріал – зазвичай ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) або PLA (lactic acid або polylactic acid), але зростає і кількість альтернативних, включаючи нейлон.

1.2 Класифікація технологій 3D-друку

Організація ASTM, що займається розробкою галузевих стандартів, розділяє 3D-адитивні технології на 7 категорій.

1. Витискання матеріалу. В точку побудови по підігрітому екструдеру подається пастоподібний матеріал, що представляє собою суміш сполучного і металевого порошку. Побудована сира модель поміщається в піч для того, щоб видалити сполуку і спекти порошок - так само, як це відбувається в традиційних технологіях. Ця адитивна

технологія реалізована під марками MJS (Multiphase Jet Solidification, багатофазне затвердіння струменя), FDM (Fused Deposition Modeling, моделювання методом пошарового наплавлення), FFF (Fused Filament Fabrication, виробництво способом наплавлення ниток).

2. Розбризування матеріалу. Наприклад, в технології Polyjet віск або фотополімер по багатоструменевій голівці подається в точку побудови. Ця адитивна технологія також називається Multi Jetting Material.

3. Розбризування сполучного. До них відносяться струменеві Ink-Jet-технології вприскування в зону побудови не модельного матеріалу, а сполучного реагента (технологія адитивного виробництва ExOne).

4. З'єднання листових матеріалів. Будівельний матеріал являє собою полімерну плівку, металеву фольгу, аркуші паперу та ін. Використовується, наприклад, в технології ультразвукового адитивного виробництва Fabrisonic. Тонкі пластини з металу зварюються ультразвуком, після чого надлишки металу видаляються фрезеруванням.

5. Фотополімеризація у ванні. Технологія використовує рідкі модельні матеріали - фотополімерні смоли. Прикладом можуть служити SLA-технологія компанії 3D Systems і DLP-технологія компаній Envisiontec, Digital Light Procession.

6. Плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. Використовується в SLS-технологіях, що використовують як джерело енергії лазер або термоголовку (SHS компанії Blueprinter).

7. Пряме підведення енергії в місце побудови. Матеріал і енергія для його плавлення надходять в точку побудови одночасно. В якості робочого органу використовується головка, обладнана системою підведення енергії і матеріалу. Енергія надходить у вигляді сконцентрованого пучка електронів (Sciaky) або променя лазера (POM, Optomec). Іноді головка встановлюється на робот-маніпулятор.

FDM (Fused Deposition Modeling) - моделювання методом пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення. Технологія FDM має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Матеріалом для друку виступають термопластики, що поставляються

у вигляді катушки ниток різних кольорів. Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі. Модель у форматі STL ділиться на шари і орієнтується відповідним чином для друку. При необхідності створюються підтримуючі структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Деякі пристрої дозволяють використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Можливим є друк моделі з одного матеріалу з печаткою опор з іншого, легкорозчинного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно можливим є друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі.

Деталь формується пошарово. Розплавлений пластик укладається по контурах, які утворено цифровою моделлю. Після укладання пластик миттєво охолоджується і твердне. По завершенню одного шару, екструдер переміщається вертикально вгору на величину товщини нитки розплавленого пластику. Формується другий шар. На рисунку 1.1 схематично показано формування шарів при 3D-друку методом FDM.

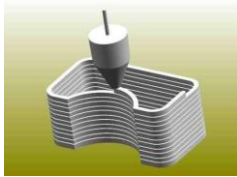


Рисунок 1.1 - Схема формування шарів деталі

Пластикову нитку подається з катушки в екструдер. Екструдер (друкована головка) – це пристрій, обладнаний механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент передає тепло на сопло, яке, в свою чергу, плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на той шар, що формується. Температура сопла може регулюватися від 150°C до 310°C для використання різних матеріалів. Як правило, верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою конвективного кожуха і вентилятора для запобігання передчасного розплавлення пластикової нитки з наступним засміченням друкуючої головки, що в свою чергу

приведе до втрати плавності подачі матеріалу, а також до втрати якості друку. Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних використовуваним в верстатах з ЧПК. Сопло переміщується по траєкторії, заданої системою автоматизованого проектування. Модель будується шар за шаром, від низу до верху. Як правило, екструдер приводиться в рух покровковими моторами або сервоприводами. Найбільш популярною системою координат, яка застосовується в FDM, є декартова система, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями X, Y і Z.

Технологія FDM відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення нависаючих структур можливо при невеликих кутах нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які, створюються в процесі друку, і відокремлюються від моделі по завершенню процесу. В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики і композити, включаючи ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Як правило, різні матеріали надають вибір балансу між певними характеристиками міцності і температурними характеристиками. Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке виробництво слугує недорогою альтернативою стандартним способам при створенні дрібносерійних партій. FDM є одним з найменш дорогих способів друку, що забезпечує зростаючу популярність побутових принтерів, заснованих на цій технології. У побуті 3D-принтери, що працюють за технологією FDM, можуть застосовуватися для створення самих різних об'єктів цільового призначення, а також іграшок, прикрас і сувенірів.

SLA (Steriolithography Apparatus) – технологія тривимірного друку, при якій рідкий фотополімер під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості і твердне, утворюючи тверду поверхню в точці проєкції лазера. У ємність з рідким фотополімером поміщається сітчаста платформа, на ній буде відбуватися вирощування прототипу. Спочатку платформа знаходиться на такій глибині, щоб її покривав найтонший шар полімеру товщиною від 0,05 до 0,15 мм – це і є приблизна товщина шару в стереолітографії. Далі включається лазер, який впливає на ті ділянки полімеру, які відповідають стінкам цільового об'єкта,

викликаючи їх затвердіння. Після цього вся платформа занурюється глибше, на глибину, рівну товщині шару. Також в цей момент спеціальна щітка зрошує ділянки, які могли залишитися сухими внаслідок деякого поверхневого натягу рідини. Схема установки представлена на рис. 1.2.

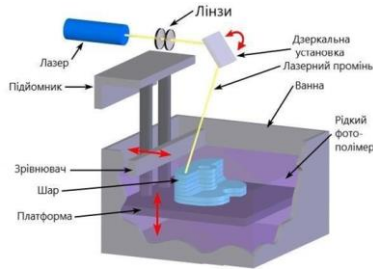


Рисунок 1.2 - Схема установки для стереолітографії

По завершенню побудови об'єкт занурюють у ванну зі спеціальними складами для видалення надлишків і очищення. І, нарешті, фінальне опромінення світлом для остаточного затвердіння. Як і багато інших методів 3D-прототипування, SLA вимагає зведення підтримуючих структур, які вручну видаляються після закінчення будівництва. Не обходиться і без істотних складнощів.

По-перше, вимоги до самого фотополімера досить суперечливі: якщо він буде густим, то його легше полімеризувати, але складніше забезпечити рівну поверхню після кожного кроку занурення; доводиться використовувати спеціальну лінійку, яка на кожному кроці проходить по поверхні рідини і вирівнює її. Велика кількість затверджувача при фіксованій потужності лазера дозволить зменшити необхідний час впливу, проте неминуче фонове засвічення «псує» навколишній обсяг полімеру і скорочує можливий термін його використання.

По-друге, повна полімеризація кожного шару зайняла б чимало часу, тому засвічення проводиться до рівня, при якому шар набуває лише мінімально необхідну міцність, а згодом готову модель, попередньо промивши від залишків рідкого полімеру, доводиться опромінювати потужним джерелом ультрафіолетового світла в спеціальній камері, щоб полімеризація досягла 100%.

Переваги технології:

- отримання дуже високої роздільної здатності і високої точності друку;
- отримання дуже великих моделей, розміром до 150×75×55 см і вагою до 150 кг;
- механічна міцність одержуваних зразків досить висока, вони можуть витримувати температуру до 100⁰С;
- відсутність обмежень на складність моделі і наявність у неї дрібних елементів;
- мала кількість відходів після друку;
- легкість фінішної обробки, якщо така буде потрібною.

Недоліки:

- обмежений вибір матеріалів для виготовлення моделей;
- неможливість кольорового друку і поєднання різних матеріалів в одному циклі;
- мала швидкість друку, максимум 10-20 мм на годину по вертикалі;
- дуже великі масогабаритні характеристики 3D-принтерів.

Незважаючи на обмеженість спектра видаткових матеріалів, вибір є, і можна отримувати моделі з різними властивостями: з підвищеною термостійкістю, гнучкі, з високою стійкістю до абразива. Для стереолітографії доступні три кольори: білий, сірий, напівпрозорий.

SLM (Selective Laser Melting) - вибіркове лазерне плавлення. Цей метод має багато спільного з методом SLA, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 10-100 мкм, тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь плавить (рис. 1.3) ділянки, що підлягають затвердінню на даному шарі моделі.



Рисунок 1.3 - Плавлення лазером порошкоподібного металу

Вихідні матеріали можуть бути самі різні: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу спеціальним валиком, який при зворотному проході видаляє надлишки порошку (рис. 1.4). Потім працює потужний лазер, спікаються частки одна з одною і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, рівну висоті одного шару для зниження потужності лазера, необхідної для спікання. Порошок в робочій камері попередньо нагрівається майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіша пікова потужність, а не тривалість впливу.



Рисунок 1.4 - Схема установки для SLM

Частки розплавляються повністю. Невикористаний порошок, який залишається навколо отверділих шарів, служить підтримкою при створенні нависаючих елементів моделі, тому немає необхідності у формуванні спеціальних підтримуючих структур. Але цей порошок по закінченні процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель буде створюватися з іншого матеріалу, так і з порожнин вже виготовленої моделі, що можна зробити, лише після її повного остигання. Часто потрібна фінішна обробка — наприклад, поліровка, оскільки поверхня може виходити шорсткою або з видимою шорсткістю. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, але і в суміші з полімером або у вигляді часток, покритих полімером, залишки яких потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі. Для металів одночасно відбувається заповнення виникаючих порожнин бронзою. Оскільки мова йде про високі температури, необхідні для спікання, процес відбувається в

азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще і запобігає окисленню.

Установки SLM, які випускаються серійно, дозволяють працювати з досить великими об'єктами, до 55×55×75 см. Технологія вибіркової лазерної плавки застосовується для побудови об'єктів складної геометричної форми, часто з тонкими стінками і порожнинами. Можливість комбінування гомогенних і пористих структур в одному об'єкті корисна при створенні імплантів з пористою поверхнею, що сприяє остеоінтеграції (зрощуванню з кістковою тканиною). Крім того, SLM успішно застосовується в аерокосмічній галузі, дозволяючи створювати високоміцні елементи конструкцій, недосяжні за геометричною складністю для традиційних механічних методів виготовлення і обробки (фрезерування, різання тощо). Якість готових виробів настільки висока, що механічна обробка готових моделей майже не потрібна. Позитивним побічним ефектом служить економія матеріалів, бо SLM в силу своєї специфіки є практично безвідходним виробництвом. В ході випробувань NASA було встановлено, що деталі для ракетних двигунів J-2X і RS-25, виготовлені з нікелевих сплавів методом SLM, дещо поступаються по щільності матеріалу аналогам, що виготовлено литтям з наступним зварюванням компонентів. З іншого боку, відсутність зварювальних швів сприятливо впливає на міцність виробів.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – метод прямого лазерного спікання – технологія адитивного виробництва металевих виробів, розроблена компанією EOS з Мюнхена. Процес включає використання тривимірних моделей у форматі STL в якості креслень для побудови фізичних моделей. Тривимірна модель підлягає цифровій обробці для віртуального поділу на тонкі шари з товщиною, що відповідає товщині шарів, які наносяться друкарським пристроєм. Готовий файл використовується як набір креслень під час друку. В якості нагрівального елемента для спікання металевих порошків використовуються оптико-волоконні лазери щодо високої потужності – близько 200 Вт. Деякі пристрої використовують більш потужні лазери з підвищеною швидкістю сканування (тобто пересування лазерного променя) для більш високої продуктивності. Як варіант, можливе підвищення продуктивності за рахунок використання декількох лазерів. DMLS дозволяє створювати цілісні металеві деталі складної геометричної форми.

Порошковий матеріал подається в робочу камеру в кількостях, необхідних для нанесення одного шару. Спеціальний валик вирівнює поданий матеріал в рівний шар і видаляє зайвий матеріал з камери, після чого лазерна головка спікає частинки свіжого порошку між собою і з попереднім шаром згідно контурам, визначеним цифровою моделлю. Після завершення малювання шару, процес повторюється: валик подає свіжий матеріал і лазер починає спікати наступний шар. Привабливою особливістю цієї технології є дуже високий дозвіл друку - в середньому близько 20 мікрон. Для порівняння, типова товщина шару в аматорських і побутових принтерах, що використовують технологію FDM, становить близько 100 мікрон. Іншою цікавою особливістю процесу є відсутність необхідності побудови опор для нависаючих елементів конструкції. Не спечений порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері. Таким чином, кожен наступний шар має опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал може бути зібраний з робочої камери після завершення друку і використаний заново. DMLS виробництво можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів; наприклад, дорогоцінних металів. Технологія практично не має обмежень по геометричній складності побудови, а висока точність виконання мінімізує необхідність механічної обробки надрукованих виробів.

Технологія DMLS володіє декількома перевагами в порівнянні з традиційними виробничими методами. Найбільш очевидним є можливість швидкого виробництва геометрично складних деталей без необхідності механічної обробки. Виробництво є практично безвідходним, що вигідно відрізняє DMLS від традиційних технологій. Технологія дозволяє створювати кілька моделей одночасно з обмеженням лише за розміром робочої камери. Побудова моделей займає близько кілька годин, що незрівнянно вигідніше, ніж ливарний процес, який може займати до декількох місяців з урахуванням повного виробничого циклу. З іншого боку, деталі, вироблені лазерним спіканням, не володіють монолітністю, а тому не досягають тих же показників міцності, що і відлиті зразки, або деталі, вироблені традиційними методами.

DMLS активно використовується в промисловості зважаючи на можливість побудови внутрішніх структур цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Деталі

з комплексною геометрією можуть бути виконані цілком, а не зі складових частин, що сприятливо впливає на якість і вартість виробів. Так як DMLS не вимагає спеціальних інструментів (наприклад, ливарних форм) і не виробляє великої кількості відходів, на відміну від традиційних методів, виробництво дрібносерійних партій за допомогою цієї технології набагато вигідніше, ніж за рахунок традиційних методів. Технологія DMLS застосовується для виробництва готових виробів малого і середнього розміру в різних галузях, включаючи аерокосмічну, стоматологічну, медичну та ін. Типовий розмір області побудови існуючих установок становить 250x250x250мм, хоча технологічних обмежень на розмір не існує – це лише питання вартості пристрою. DMLS використовується для швидкого прототипування, знижуючи час розробки нових продуктів, а також у виробництві, дозволяючи скорочувати собівартість дрібних партій і спрощувати складання виробів складної геометричної форми.

1.3 Матеріали для 3D-друку та аналіз методів пост-обробки

Україна входить в топ країн с розвитою структурою послуг 3D-друку. В особливості для FDM-друку промисловість надає дуже різноманітний спектр витратних матеріалів, які представлені трьома виробниками філаменту. Також особливістю ринку філаменту в Україні є різноманіття пластиків, які являються сумішшю декількох полімерів, з торговою назвою яку дав конкретний виробник. Вони мають свої властивості і не співпадають з пластиками, які пропонують інші виробники, а також виробники інших країн. Так, наприклад, назва ABS+ відноситься до пластику ABS, але зі зниженим згортанням при охолодженні. Компонент який додає цю властивість не документован і у різних виробників може відрізнятись.

ABS-пластик, акрилонітрілбутадієнстірол. Це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не має запаху, не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 220⁰С до 240⁰С. У продажу зустрічається у вигляді порошку або тонких пластикових ниток, намотаних на катушки, як показано на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 - ABS-пластик для 3D-принтера

3D-моделі, зроблені з ABS-пластика, довговічні і міцні. Асортимент кольорів ниток дуже великий, дозволяє втілити будь-яке кольорове рішення, але за допомогою цього матеріалу неможливо отримати прозорі моделі, адже прозорого ABS пластика не існує. ABS пластик має гарну пластичність, рівномірну та однорідну якість поверхні надрукованих виробів. Вироби легко обробляються в етилацетаті, ацетоні, дихлоретані, дихлорметані. Чудово підходить для 3D-друку більшості ненавантажених виробів, до яких не пред'являються високі вимоги. Температура експлуатації від -10°C до $+90^{\circ}\text{C}$. ABS - полімерний матеріал, спеціально розроблений для якісного FDM 3D-друку. Модифікована формула матеріалу дозволяє використовувати його для друку різних виробів при температурах нижче звичайного ABS пластику на вищій швидкості 3D-друку, при цьому абсолютно забувши про проблеми з адгезією до платформи, деламінацією та деформацією виробу. Вироби, які надруковані з ABS+ пластику, мають гарну рівномірну та однорідну поверхню. Цей матеріал призначений для 3D-друку великих виробів з можливістю подальшої обробки. Вироби витримують температури до -40°C , а також володіють підвищеною міцністю, внаслідок збільшення міжшарової адгезії. Температура експлуатації від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$. ABS+(plexiwire) – аналог попереднього пластику від виробника plexiwire.

СОРЕТ - більш жорсткий у порівнянні з ABS пластиком. Прозорий в натуральному кольорі, згинається в холодному стані без побіління в місці згину. Володіє високою прозорістю і рівномірним світлорозсіюванням. Для соРЕТ характерні: висока розмірна стабільність, глянцева поверхня; інертність до розчинників; висока адгезія між шарами при друці; відсутність деламінації і деформації при друці. Рекомендується для 3D-друку деталей технічного призначення - втулки, муфти, підшипники, несильно навантажені шестерні тощо. Використовується для 3D-друку прозорих виробів

різного призначення - макети, декорації, вивіски. Температура експлуатації від -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. PETG(plexiwire)- аналог пластику соPET від виробника plexiwire.

PLA-пластик – це самий екологічно чистий матеріал для 3D-принтерів. Він виготовляється із залишків біомаси, силосу цукрових буряків або кукурудзи. PLA - пластик є найкращим матеріалом для початку роботи з 3D-принтером. Практично повна відсутність усадки у цього пластика сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі геометрично складніші, ніж при використанні ABS. Матеріал призначений для 3D-друку різних виробів з підвищеною деталізацією, макетів, прототипів, іграшок. Температура експлуатації від -10°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Маючи масу позитивних властивостей, PLA має два істотних недоліки. По - перше, виготовлені з нього моделі недовговічні і поступово розкладаються під дією тепла і світла. По - друге, вартість виробництва PLA дуже висока, а значить і вартість моделей буде значно більшою за вартість аналогічних моделей, виготовлених з інших матеріалів. За зовнішнім виглядом PLA нитка не відрізняється від ABS нитки.

PC - прозорий матеріал для 3D-друку, з характерною високою жорсткістю і одночасно високими характеристиками міцності. Стійкий до високих температур. Використовується для 3D-друку деталей різного призначення: корпусів, кріплень з температурою експлуатації до 120°C .

PET - прозорий матеріал для 3D-друку, має високу механічну міцність і ударну стійкість. Стійкий до стирання і багаторазовим деформаціям при розтягуванні і згині, можливе гартування. Використовується для 3D-друку різних виробів, що експлуатуються при високих температурах. Температура експлуатації від -60°C до $+220^{\circ}\text{C}$. Найчастіше після друку може з'явитися необхідність провести допоміжну обробку здобутої деталі (пост-обробка). В цьому випадку усі вище наведені пластики в практичному застосуванні мають деякі особливості, котрі у більшості випадків не описані виробником. Так пластики ABS та ABS+ при побудові на принтері у зв'язку з усадкою мають ефект відриву від платформи, а також підгинанню краю на великих деталях. Але ці пластики мають найліпший показник для механічної обробки після друку, тому незважаючи на недоліки вони дуже часто використовуються.

Нейлон. Друк нейлоном (рис. 1.6) схожий з печаткою ABS-пластиком. Але для друку нейлоном потрібна вища температура друку, що знаходиться в діапазоні від 260°C до 280°C та закриту камеру, що підігрівається. У нейлону висока здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Великі незручності викликає необхідність відкачки повітря з екструдера через токсичність компонентів нейлону, або друк під потужною вентиляційною системою. Через низький коефіцієнт тертя нейлону в екструдері необхідно замінити механізм на спеціальний, з великим коефіцієнтом зацепу. Незважаючи на перераховані недоліки, нейлон з успіхом використовують в 3D-друку, адже деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS-пластика, і його можна використовувати в шарнірах ковзання.



Рисунок 1.6 - Нейлон для 3D-друку

PLA пластик дуже жорсткий і погано обробляється механічно, хоча і не має недоліків типу усадки і відривання, тому частіше його використовують без подальшої обробки.

СОРЕТ(PETG) має найбільшу жорсткість, але в процесі побудови з'являється дуже багато напливів у зв'язку з високою плинністю у розплавленому стані, які потім важко видалити, тому що пластик дуже жорсткий.

PC пластик жорсткий, не має усадки, але у зв'язку з високою температурою друку і поверхні платформи (110°C - 120°C), його можливо використовувати тільки на принтерах, які підтримують ці параметри. Дослідження властивостей пластиків, які пропонують українські виробники дуже актуально, тому що вони дають можливість здобути найвищий показник якості і ціни на сучасному індустріальному просторі.

На сьогоднішній час технологія 3D-друку не завжди дозволяє нам отримати виріб готовий до використання відразу після друку. Після 3D-друку (зокрема FDM методом) досить часто стає проблема

додаткової обробки деталі для поліпшення якості поверхні, а також зменшення відхилень розмірів від 3D-моделі.



Рисунок 1.7 – Шари надрукованої деталі FDM методом

І з цього погляду відмінність між технологіями лише в тому, що після одних потрібно більше часу на пост-обробку, а після інших менше, але факт залишається фактом, пост-обробка – це невід'ємний етап виготовлення виробу методом адитивного виробництва. Також при побудові деталей досить часто використовуються підтримуючі структури, які після друку потрібно видалити, і цей процес також негативним чином віддзеркалюється на якості поверхні. В більшості випадків для пост-обробки використовується ручна механічна обробка, піскоструминна обробка, хімічна обробка. Дані методи використовують багато ручної праці або не дозволяють точно витримати розміри.

Хімічна обробка. Хімічна обробка в парах ацетона найбільш популярний метод. Принцип його полягає в тому, що деталь розміщується в замкненому просторі, де є пари якогось розчинника пластику (для ABS найчастіше використовується ацетон або етілацетат, для PLA - діхлорметан) та залишається на деякий час (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 - Хімічна обробка

Пари розчинника підплавляють поверхню деталі і таким чином усі нерівності згладжуються. Для прискорення цієї операції іноді ще додають підігрів внутрішнього простору (рис. 1.9).

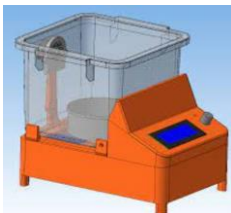


Рисунок 1.9 - Конструкція парової камери

Але цей метод має недоліки. Так великі за розміром деталі згладжуються не рівномірно, у зв'язку з тим що пари у камері розповсюджуються теж нерівномірно. Цей недолік можливо компенсувати примусовим потоком повітря в камері, а також обертанням платформи з деталлю. Другий недолік хімічного методу полягає в тому, що згладжуються усі гострі грані та дрібні елементи, тому він може застосовуватися лише для дизайнерських макетів, но не для технічних деталей. Третій недолік з'являється при обробці серії деталей, при цьому неможливо досягнути повторюваності, у зв'язку з тим що неможливо кожного разу витримати однакову щільність розчиненого у повітрі розчинника при кожному запуску процесу обробки.

Ручне шліфування. Шліфування робиться ручним методом або за допомогою наждачного паперу або ручними електроінструментами. Шліфування починається спочатку наждачним папером з низькою зернистістю (200-250), потім потрібно переходити на більш високу - 600, 1000, 2000. Недоліки методу в тому, що на це витрачається дуже багато часу ручної праці, також немає повторюваності деталей, окрім того матеріал видаляється нерівномірно на деталях з великою кількістю поверхонь.

Шпаклювання. Для позбавлення щілин на бічних поверхнях використовують затирання спеціальною шпаклівкою для пластику (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Шпаклювання поверхні

Шпаклювання ефективно заповнює щілини, але після цього все одно потрібно шліфуванням вирівняти поверхню. Також цей метод псує естетичний вигляд виробу, тому його найчастіше використовують для подальшої ґрунтовки та фарбування.

ґрунтовка та фарбування. ґрунтовка – це процес покриття деталі спеціальним матеріалом. В основному він служить основою для подальшої фарбувальної роботи. ґрунтовка може бути виконана тільки після того, як деталь відшліфована наждачним папером з помірною зернистістю (близько 600). Після ґрунтування деталь фарбується. Процес фарбування використовується для покращення естетичного вигляду деталі. Коли потрібна точність розмірів, дана методика не може бути використана.

Піскоструминна обробка. Цей метод більш продуктивний по часу і дає якісну поверхню. Суть методу в тому, що деталь розміщується у закритій камері і на неї спрямовується потік дрібних частинок, які знімають поверхневий шар та залишають рівномірну матову поверхню. Не висока повторюваність, хоч і більша за попередні методи. Даний метод найбільш часто використовують для обробки поверхні під фарбування (рис. 1.11).

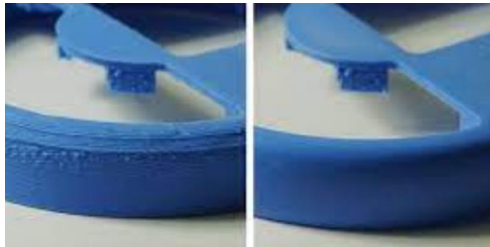


Рисунок 1.11 - Піскоструминна обробка

Галтування. Метод полягає у тому, що виріб розміщується у барабані, заповненому пластиковими кульками. Він здійснює вібраційний рух, а також обертання. При терті виробу о кульки нерівності деталей згладжуються (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 - Галтувальний барабан

Цей метод є повністю автоматичним. Але у нього багато недоліків. По-перше, це дрібні елементи, які на моделі можуть бути відірвані від поверхні. Також неможливо контролювати зменшення розмірів. Цей метод залишає полоси від 3D-друку, хоча робить їх менш помітними (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 - Деталь до галтування (а) та після нього (б)

Фрезерування після FDM-друку є додатковим процесом обробки для покращення якості або досягнення певних характеристик у 3D-друкованих деталях. Після завершення процесу FDM-друку, отримана деталь може мати невеликі недоліки, сліди шарів або інші недосконалості, пов'язані з самим процесом друку. Для фрезерування після FDM-друку потрібен спеціалізований фрезерний верстат, обладнаний відповідними налаштуваннями та інструментами. Фрезерування після друку може бути особливо корисним для створення прототипів, функціональних моделей або деталей, які

вимагають більш високої точності та якості поверхні, ніж може надати сам процес друку. Якість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи вихідну якість FDM-друку, матеріал, що використовується для 3D-друку, параметри фрезерування та якість фрезерного верстата. Якщо деталь, отримана в результаті FDM-друку, має нерівності, сліди шарів або інші дефекти поверхні, то фрезерування може не повністю усунути ці недоліки. Чим гладкіша і точніша стартова поверхня, тим кращий результат фрезерування.

Різні матеріали, що використовуються в процесі FDM-друку, можуть мати різні властивості і поведінку при фрезеруванні. Деякі матеріали можуть бути більш придатні для фрезерування, так як вони легше обробляються, мають меншу схильність до задирок і пропонують кращу якість поверхні. Налаштування та параметри, що використовуються при фрезеруванні, такі як подача, глибина різання, тип фрези тощо, впливатимуть на якість поверхні. Належне налаштування параметрів фрезерування допоможе досягти оптимальних результатів. Використання високоякісного фрезерного верстата з точними двигунами та надійним керуванням дозволяє досягти більш гладкої та точної обробки поверхні.

Шорсткість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи тип використовуваного матеріалу, якість та налаштування фрезерного верстата, а також якість та точність вихідного FDM-друку. Відсутність високої якості у будь-якому з цих етапів може призвести до більш шорсткої поверхні після фрезерування. Важливо відзначити, що шорсткість відрізнятиметься в залежності від складності геометрії деталі, а також використовуваного інструменту та налаштувань фрезерного верстата. Сам процес FDM-друку може залишити сліди шарів і невеликі нерівності на поверхні деталі. Якість фрезерування і, отже, шорсткість поверхні залежить від точності руху інструменту, його гостроти та швидкості, а також особливостей матеріалу, з яким працюють. Якщо матеріал надто м'який або має нерівномірні властивості, фрезерування може спричинити відколи або інші неоднорідності.

Фрезерування після FDM-друку є актуальним та привабливим для багатьох сфер застосування. Фрезерування після FDM-друку залишається важливим, оскільки може надати безліч переваг у виробництві чи прототипуванні:

- покращення якості поверхні; фрезерування може усунути сліди шарів та інші недоліки, що особливо корисно, якщо потрібна висока точність та гладкість поверхні;
- точність, що досягається; комбінування FDM-друку з фрезеруванням дозволяє досягти більш високої точності деталей, ніж може забезпечити тільки 3D-друк.

Комбінування різних методів обробки може надати додаткові можливості у створенні складних деталей та виробів з покращеними характеристиками.

1.4 Основні сфери застосування

3D-друк знаходить широке застосування у виготовленні архітектурних макетів будинків, споруд, цілих мікрорайонів, котеджних селищ з усією інфраструктурою: дорогами, деревами, вуличним освітленням. Для друку тривимірних архітектурних макетів використовують дешевий гіпсовий композит, який забезпечує низьку собівартість готових моделей.

Інженери з університету Південної Каліфорнії створили систему 3D-друку для роботи з великогабаритними об'єктами. Система працює за принципом будівельного крана, який зводить стіни з шарів бетону. Такий 3D-принтер може звести двоповерховий будинок всього лише за 20 годин. Робочим залишиться тільки встановити вікна, двері і провести внутрішню обробку приміщення.

Професійні 3D-принтери поступово відвойовують свої позиції в сфері дрібносерійного виробництва. Найчастіше дану технологію друку використовують для виготовлення ексклюзивних виробів, наприклад предметів мистецтва, фігурок персонажів для учасників рольових інтернет-ігор, прототипів і концептуальних моделей майбутніх споживчих товарів або їх конструктивних деталей. Такі моделі використовуються як в експериментальних цілях, так і для презентацій нових товарів.

Використання 3D-принтерів в медицині дозволяє врятувати людські життя. Такі принтери можуть відтворити точну копію людського скелета для відпрацювання прийомів, які гарантують проведення успішної операції. Все частіше 3D принтери

використовують в протезуванні та стоматології, так як тривимірний друк дозволяє отримати протези і коронки значно швидше класичною технологією виробництва.

Медичні тривимірні моделі можуть бути виготовлені з цілого ряду матеріалів, включаючи живі органічні клітини. Вибір того чи іншого матеріалу для медичного прототипування залежить від цілей і завдань, що стоять перед медиками, і проблем, пов'язаних зі здоров'ям пацієнта.

Як відомо, при виготовленні ювелірних виробів самої трудомісткою процедурою є створення воскових прототипів, яке вимагає колосальних витрат часу. З появою 3D-принтерів у ювелірів з'явилася можливість швидко вирощувати воскові моделі прикрас, попередньо розроблені у спеціальній програмі. Для створення прототипів ювелірних прикрас з використанням 3D-принтера використовується спеціальний матеріал, по своєму складу схожий на ювелірний віск.

2 НАНОТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

2.1 Основні поняття і визначення

Як і будь-яка галузь знань, нанонаука має свою специфічну систему термінів. У багатьох країнах ведеться розробка стандартів, що стосуються нанотехнологій. Наприклад, в Міжнародній організації зі стандартизації (ISO), що об'єднує 157 національних організацій, в 2005 році був створений Технічний комітет з розробки стандартів для нанотехнологій (ISO/TC 229), в тому числі в галузі термінології.

Нано - десяткова приставка (в перекладі з грецького nanos - «карлик»), що означає одну мільярдну частину будь-якої величини. Наномасштаб має на увазі порядок розмірів між 1 і 100 нанометрів ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм}$).

Нанотехнології - міждисциплінарна область науки, в якій вивчаються закономірності фізико-хімічних процесів в просторових областях нанометрових розмірів з метою управління окремими атомами, молекулами, молекулярними системами при створенні нових молекул, наноструктур, наноустроїв і матеріалів зі спеціальними фізичними, хімічними і біологічними властивостями. Нанотехнології -

це також сукупність методів і прийомів, що забезпечують можливість контрольованим чином створювати і модифікувати об'єкти, що включають компоненти з розмірами менше 100 нм, що мають принципово нові властивості і дозволяють здійснювати їх інтеграцію в повноцінно функціонуючі системи більшого масштабу.

Наноматеріали - це матеріали, що містять структурні елементи (кристаліти, волокна, шари, пори), геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують нанотехнологічного кордону-100 нм (від 1 до 100 нм), що володіють якісно іншими в порівнянні з традиційними матеріалами фізичними, хімічними, механічними і біологічними властивостями, функціональними та експлуатаційними характеристиками. Верхня межа діапазону обумовлена тим, що істотні зміни властивостей матеріалів починаються при розмірах структурних елементів менше 100 нм. Нижня межа діапазону обумовлена критичним розміром нанокристалічного матеріалу як структурного елементу, що має впорядковану будову, тобто кристалічну решітку (наприклад, для заліза цю межу становить 0,5 нм). Термін «наноматеріали» є об'єднуючим і включає в себе велику групу різних матеріалів - нанокристалічних, нанофазних, нанокомпозитних, нанопористих, а також нанокластери, наночастинки, нанопорошки, нанопокриття, фулерени, нанотрубки тощо.

Нанокристалічні (наноструктурні, нанофазні) матеріали - матеріали, у яких розмір окремих кристалітів або фаз, що складають структурну основу, не перевищує 100 нм хоча б в одному вимірі. Об'ємні (масивні, компактні) наноматеріали - наноматеріали, що складаються з великого числа нанорозмірних елементів (кристалітів), тобто полікристалічні матеріали з розміром зерна 1...100 нм. Консолідовані наноматеріали - компактні наноматеріали, плівки та покриття з металів, сплавів і з'єднань, що отримуються методами порошкової технології, інтенсивної пластичної деформації, контрольованої кристалізації з аморфного стану і різноманітними прийомами нанесення плівок і покриттів.

Нанокластери (атомні кластери, наночастинки, атомні частки) - низькорозмірні структури, що мають характеристичні розміри менше 100 нм (1...100 нм), що складаються з десятків, сотень або тисяч атомів.

Фулерени - особливий вид нанокластерних структур; стабільні замкнуті сферичні і сфероїдальні багатоатомні молекули, поверхня

яких утворена правильними многогранниками з атомів вуглецю (або іншого елемента), що проявляють істинно нанорозмірні ефекти.

Нанотрубки - ниткоподібні наночастинки з атомів вуглецю або інших елементів діаметром не більше 100 нм, що містять протяжну внутрішню порожнину.

Нановолокна - ниткоподібні частинки діаметром не більше 100 нм, що не мають внутрішньої порожнини.

Квантові точки, дрот, ями - штучно створені кластерні наноструктури з розмірним квантуванням руху носіїв заряду в трьох, двох і одному напрямках відповідно.

Нанопорошки (ультрадисперсні порошки) - порошки з розміром частинок менше 100 нм.

Наноструктурні (нанопокриття) покриття - покриття нанометрової товщини (наношарові покриття); покриття з нанометровим розміром кристалітів (нанокристалічні покриття).

Нанокompозити - композиційні матеріали з металевою, полімерною, керамічною матрицею і наповнювачем у вигляді наночастинок, нановолокон, наношарів, а також композиційні матеріали зі складним використанням нанокompонентів.

Нанонаука - система знань, заснована на описі, поясненні та прогнозуванні властивостей матеріальних об'єктів з нанометровими характеристичними розмірами або систем більш високого метричного рівня, упорядкованих або самовпорядкованих на основі нанорозмірних елементів.

Нановиробництво - виробництво або підготовка наноструктур.

Наносистема - матеріальний об'єкт у вигляді впорядкованих або самовпорядкованих, пов'язаних між собою елементів з нанометровими розмірами, кооперація яких забезпечує виникнення у об'єкта якісно нових властивостей, пов'язаних з проявом наномасштабних факторів.

Нанооб'єкт - фізичний об'єкт досліджень (і розробок), розміри якого прийнято вимірювати в нанометрах.

Наномеханіка - наука про кінетику нанооб'єктів, в якій вирішуються завдання переміщення і транспортування атомів і молекул; управління атомами, молекулами і їх системами; створення нових молекул, наноструктур, наноустроїв; бездефектних матеріалів і матеріалів з принципово новим рівнем фізико-механічних, хімічних і біологічних властивостей.

2.2 Структура і властивості наноструктурних матеріалів

Речовина наносистем в порівнянні з традиційними об'єктами з мікроскопічними характеристичними розмірами має наступні особливості:

- нанометровий розмір кристалітів;
- дискретний характер атомно-молекулярної структури;
- високу долю поверхневих атомів;
- безліч меж розділу;
- квантові закономірності поведінки;
- потенційну багатофункціональність;
- передумови до мінімізації, зниження енергоємності, матеріаломісткості виготовлення виробів тощо.

Упродовж багатьох років принциповою основою матеріалознавства служили наступні властивості матеріалу: хімічний склад, реальна структура (тобто далекий і ближній порядок в розташуванні атомів, а також номенклатура дефектів), температура. В останні десятиліття до них додався характерний розмір частки або елемента структури. Саме розмірні ефекти визначають багато унікальних властивостей наночасток і наноматеріалів. Для різних характеристик (механічних, електричних, магнітних, хімічних, квантових тощо) критичний розмір елемента структури, при якому спостерігається "аномалія" властивостей, може бути різним, як і характер змін (рівномірний або нерівномірний).

Завдяки варіюванню і комбінації складу, розмірних параметрів наноструктури можливе отримання матеріалів з характеристиками, які не мають аналогів у рамках існуючих класичних методик і підходів. Істотні зміни властивостей наноматеріалів в порівнянні з традиційними аналогами пов'язані, в першу чергу, з особливостями їх структурного стану.

При переході від макрооб'ємів до нанооб'єктів відбувається зміна співвідношення поверхневих і об'ємних атомів матеріалу. Для наночасток доля атомів, що знаходяться в тонкому поверхневому шарі (його товщину приймають, як правило, рівною 1 нм, що відповідає 2...3 атомним шарам для більшості металів), в порівнянні з мезо- і мікрочастками помітно зростає. До певного розміру часток доля

поверхневих атомів мала, їх вкладом можна нехтувати. У наночасток властивості поверхневих атомів стають визначальними, рис. 2.1.

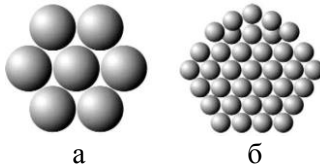


Рисунок 2.1 – Схема розташування атомів в наночастці (а) і в об'ємному матеріалі (б)

Доля приповерхневих атомів a пропорційна відношенню поверхні S частки до її об'єму V : $a \sim S/V$. Якщо позначити характерний розмір частки як R і прийняти, що частинки мають сферичну форму, то у міру зменшення їх розміру велика частка атомів виявляється на вільних поверхнях: $a \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$. Отримуємо наступні співвідношення між діаметром зерна (частки) і об'ємною долею поверхневого шару:

діаметр зерна (частки), нм.....	100	50	25	20	10	6	4
об'ємна доля поверхневого шару, %.....	6	12	24	30	60	100	150.

Таким чином, в нанокристалічних матеріалах, починаючи з діаметру зерна 6 нм, об'єм поверхневого шару стає більше об'ємної долі кристалів. Поверхневі атоми мають властивості, відмінні від об'ємних, оскільки вони пов'язані з "сусідами" інакше, ніж в об'ємі (змінюється координаційне число, симетрія локального оточення тощо). У поверхневих атомів, у відмінності від тих, що знаходяться в об'ємі твердого тіла, задіяні не усі зв'язки з сусідніми атомами. В результаті в приповерхневому шарі може статися атомна реконструкція і виникнення іншого порядку розташування атомів, що призводить до спотворень кристалічної решітки і навіть до зміни її типу. У загальному випадку поверхневі атоми знаходяться на ближчих відстанях один від одного, чим атоми в об'ємі кристалічної решітки, мають підвищений запас енергії. Поверхня навіть найідеальнішого кристала може вважатися великим двовимірним або навіть об'ємним дефектом і служить стоком (майже нескінченній місткості) для більшості дефектів кристалічної будови, в першу чергу, вакансій і дислокацій. При малих розмірах часток цей ефект помітно зростає, що може призводити до виходу більшості структурних дефектів на

поверхню і очищення матеріалу наночастки від дефектів структури і хімічних домішок. Встановлено, що процеси деформації і руйнування протікають в тонкому приповерхневому шарі з випередженням в порівнянні з внутрішніми об'ємами кристалічного матеріалу, що багато в чому визначає механічні властивості (міцність, пластичність).

Ще одним аспектом є прояв тонких фізичних ефектів, пов'язаних із специфічним характером взаємодії електронів з вільною поверхнею. З'являються аномалії поведінки електронів, квазічастинок і інших елементарних збуджень, які спричиняють зміну фізичних властивостей наноструктурних систем в порівнянні з масивними матеріалами. Усе це разом узятє істотним чином змінює механічні, електричні, оптичні і інші властивості і дозволяє розглядати приповерхневий шар як деякий новий стан речовини.

Для наноматеріалів увесь матеріал "працює" як приповерхневий шар. У структурі наноматеріалів виділяють відносно слабо спотворені центральні частини зерен ("внутрішньозернову фазу") і сильно спотворені зони уздовж меж зерен шириною близько декількох нанометрів ("зернограничну фазу"), рис. 2.2. Кількісне співвідношення цих зон стає істотним при нанометровому масштабі зерен (менше 100 нм).

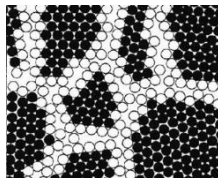


Рисунок 2.2 – Модель будови нанокристалічного матеріалу

2.3 Фізичні властивості

Особливістю наноматеріалів є збіг розмірів наночасток з "характерними" (критичними) розмірами для багатьох фізичних явищ і властивостей. Якщо розмір часток менше визначеної для кожної властивості характеристичної довжини, можлива поява нових фізичних властивостей. В порівнянні із звичайними матеріалами в

наноматеріалах змінюються такі фундаментальні характеристики, як модуль пружності, питома теплоємність, температура плавлення, коефіцієнт дифузії, магнітні і електричні властивості. Стає іншою фізична суть багатьох процесів. Зміна деяких властивостей наноматеріалів як відгук на зменшення розміру зерна до нанодіапазону приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Розмірна залежність деяких характеристик фізичних властивостей матеріалів

Властивості	Відгук матеріалу на зменшення розміру
Термічні	Пониження температури фазових переходів, в т.ч. температури плавлення
Кінетичні	Аномально високі значення коефіцієнтів дифузії
Теплові	Підвищення теплоємності, пониження теплопровідності
Електричні	Більш високий питомий електроопір металів, більш висока електропровідність кераміки, можливість надпровідності вуглецевих нанотрубок
Магнітні	Зростання магнітної проникності, супермагнетизм

При переході до нанорозмірного стану відбувається істотне зниження температури плавлення $T_{пл}$. Залежно від матеріалу і розміру елементів наноструктури зменшення $T_{пл}$ може складати сотні градусів за шкалою Кельвіна. Наприклад, $T_{пл}$ золота складає зазвичай 1340 К, перехід до нанорозмірного стану викликає істотне зниження цього параметра, при розмірі зерен ~2 нм температура плавлення золота складає 400 К, тобто знижується майже на 1000 К. Зменшення температури плавлення спостерігається також у інших металів (Sn, Pb, Cu, Al, Bi), у деяких хімічних сполук.

Нанометровий розмір призводить до зміни електропровідності матеріалів. Питомий електроопір металевих наноматеріалів (наприклад, Fe, Cu, Ni, Pd, а також сплавів на їх основі) істотно підвищується внаслідок розсіяння електронів на межах зерен, а діелектрична проникність знижується при зменшенні розміру зерна. Неметалічні матеріали, наприклад, керамічні, проявляють більш високі значення електропровідності в порівнянні із звичайним станом.

Наноструктури на основі вуглецю демонструють широкий діапазон електричних властивостей - від діелектричних до надпровідності: один і той же матеріал (вуглецеві нанотрубки) при різній дії, наприклад, легуванні або зміні геометрії може бути діелектриком, провідником, надпровідником.

Розмірна залежність характерна і для магнітних властивостей наноматеріалів - коерцитивної сили, залишкової намагніченості, магнітоопору. Зокрема, зі зменшенням розміру зерна до нанометрового діапазону спостерігається зростання коерцитивної сили, магнітоопору.

2.4 Хімічні властивості

Існують численні експериментальні свідчення наявності у речовин у нанорозмірному стані, відмінних від макро- та мікроструктурних аналогів хімічних властивостей.

Наночастинки є системами, що володіють надмірною енергією та високою хімічною активністю. Частинок розміром ~1 нм практично без енергії активації вступають у процеси агрегації та реакції з іншими хімічними сполуками, в результаті яких отримують речовини з новими властивостями. Зокрема, аномально високу реакційну здатність виявляють металеві нанокластери. Вуглецеві кластери (фулерени), володіючи високою електронегативністю, тобто здатністю в з'єднаннях притягувати до себе електрони, вступають у хімічних реакціях як сильні окисники. Приєднуючи себе радикали різної хімічної природи, дані наночастинки можуть утворювати широкий клас хімічних сполук з різноманітними фізико-хімічними властивостями - магнітними, електричними, оптичними.

Висока питома поверхня наноматеріалів збільшує їхню здатність до адсорбції, капілярні властивості. Наприклад, вуглецеві нанотрубки мають високі сорбційні характеристики (поглинають водень, азот, кисень, пари води, вуглекислий газ, органічні домішки з водних розчинів тощо) та є своєрідними високомісткими акумуляторами і нанофільтрами; проявляють капілярні ефекти (зокрема стосовно розплавів чи розчинів металів – заліза, нікелю, кобальту, свинцю тощо).

Для багатьох наноструктурних матеріалів (покриттів, об'ємних матеріалів) характерна підвищена стійкість до окиснення, що пояснюється великою кількістю кордонів зерен та високими швидкостями дифузії та висока корозійна стійкість.

2.5 Механічні властивості

При різних схемах випробувань наноструктурні матеріали (зокрема метали Fe, Cu, Ti, Ni, Ag, Pd та інші) демонструють значно вищі порівняно з традиційними аналогами значення багатьох характеристик механічних властивостей - межі плинності, тимчасового опору, твердості, ударної в'язкості, втомної міцності тощо. Високі характеристики механічних властивостей наноструктурних матеріалів обумовлені, передусім, малими розмірами їх зерен і великою об'ємною часткою, займаною межами зерен (табл. 2.2 и 2.3).

Таблиця 2.2 - Механічні властивості вуглецевих нанотрубок

Матеріал	Модуль Юнга E , ГПа	Межа міцності (тимчасовий опір) σ_B , ГПа
Вуглецеві одношарові нанотрубки	1,3...1,8	45
Вуглецеві багатошарові нанотрубки	0,6...1,3	7
Сталь високоміцна	0,2	2...3

Однією з найважливіших механічних властивостей матеріалів, як відомо, є міцність, яка визначається хімічним складом і реальною атомарною структурою, тобто наявністю певної кристалічної решітки (чи її відсутністю) і усім спектром її недосконалості. Високих показників міцності можна досягти двома прямо протилежними способами: знижуючи концентрацію дефектів структури (у межі наближаючись до ідеального монокристалічного стану) або, навпаки, збільшуючи її аж до створення мелкодисперсного нанокристалічного

або аморфного стану. Один з основних механізмів зміцнення в цьому випадку обумовлений ефектом скупчення дислокацій поблизу перешкод, якими при зменшенні розмірів зерен є їх межі.

Обидва шляхи широко використовують в сучасному фізичному матеріалознавстві, і в обох напрямках межі, що існували до недавніх пір, здолані на основі використання наноматеріалів.

Таблиця 2.3 - Характеристики нанокристалічних покриттів

Склад	Товщина покриття, мкм	Розмір зерна, нм	Мікротвердість HV , ГПа
TiN	1...2	5...30	35...50 (21...26)*
TiB ₂	1...4	2...8	50...70
Ti(B,N,C) _x	2...5	1...5	60...70
TiN/Si ₃ N ₄	2	9	50
TiN/NbN	2	10	78
TiN/NbN	2	10	70 (34)*
TiC/TiB ₂	3	1...2,5	71

*У дужках вказані значення мікротвердості для покриттів з мікрокристалічною структурою

Як видно, основні механічні властивості наноматеріалів (межа плинності σ_m , тимчасовий опір σ_s , мікротвердість HV) можуть істотно перевищувати аналогічні показники крупно- і мікрокристалічних аналогів, що обумовлено впливом сукупності розмірних ефектів, характерних для матеріалу в наностані. Найефективніше проявляється підвищення механічних характеристик у бездефектних вуглецевих одношарових нанотрубках, міцність яких може більше, ніж в 20 разів перевищувати відповідний показник для високоміцних сталей (див. табл. 2.2). Для пластичних металів і сплавів перехід в нанокристалічний стан супроводжується, як правило, підвищенням механічних властивостей в 4,8 разів в порівнянні з традиційними великокристалічними об'єктами, що зв'язують, передусім, з впливом меж зерен як бар'єрів для дислокаційних зрушень.

Значення міцності металевих плівок нікелю, міді, срібла при зменшенні їх товщини до нанорозмірів можна порівняти з міцністю

конструкційних сталей після термообробки. Для крихких матеріалів (нітриду, карбідів, бориду) збільшення показників механічних властивостей, наприклад, твердості (див. табл. 2.3), відбувається в 1,5...2 рази, що також дуже істотно. Функціональні покриття TiN, TiB₂, Ti (B, N, C)_x, і так далі при розмірі кристалітів 1...10 нм і товщині 1...5 мкм мають значно більш високі в порівнянні з традиційними покриттями того ж складу значення твердості, сумірні з твердістю компакт-дисків алмазу після динамічного пресування(63...68 ГПа).

Унікальною особливістю наноматеріалів є те, що властива їм висока міцність доповнюється і високою пластичністю або навіть надпластичністю, тобто досягається оптимальне поєднання властивостей міцність-пластичність. Ця обставина дуже важлива, оскільки в традиційних матеріалах збільшення міцності веде до зниження пластичності. Найкраще співвідношення цих властивостей мають металеві матеріали, передусім, сталі.

Зменшення структурних елементів (розмірів зерен) нижче критичних призводить до прояву специфічних недислокаційних механізмів пластичної деформації, оскільки завдяки малому розміру зерен вірогідність появи рухливих дислокацій в зерні надзвичайно мала. "Включається" особливий механізм деформації у вигляді зернограничного некристалографічного ковзання, вже при низьких температурах що конкурує з дією стандартного кристалографічного внутрішньозеренного дислокаційного ковзання і двійникування. Про можливість реалізації недислокаційних механізмів пластичності свідчить також властивість наноматеріалів проявляти надпластичність досягши мір деформації 1000% і більше. Як відомо, для реалізації ефекту структурної надпластичності однією з необхідних умов є наявність дрібнозернистої структури, а основним механізмом надпластичності є зернограничне ковзання. Багато наноструктурних матеріалів проявляють високотемпературну надпластичність в результаті зернограничного прослизання при більш високих швидкостях деформації і менших температурах, ніж звичайні полікристалічні сплави тих же складів в режимі надпластичності.

Разом зі збільшенням механічних характеристик спостерігається також зростання багатьох показників експлуатаційних властивостей наноматеріалів. Нанокристалічні матеріали мають високі демпфуючі властивості, що важливо для зменшення шкідливих дій циклічних

навантажень, яким піддаються різні конструкції, для зменшення шумів, пов'язаних з вібрацією механізмів, підвищення точності вимірів тощо. Збільшення демпфуючої здатності в наноматеріалах пов'язане з неоднорідним поширенням пружних коливань і істотним їх розсіянням із-за відмінності модулів пружності самих зерен і граничних шарів. Наприклад, у нанокристалічній міді рівень фону внутрішнього тертя, що є мірою демпфуючої здатності, в 2,3 разу вище, ніж у сірого чавуну, який вважається хорошим демпфером.

2.6 Наноструктурні конструкційні матеріали

Однією з найважливіших областей застосування нанотехнологій та наноматеріалів є створення принципово нового класу конструкційних матеріалів - з гранично високою міцністю, що поєднують високу міцність і пластичність, що мають високу питому міцність, здатні змінювати свою структуру і властивості в залежності від зовнішніх впливів і т.д. На відміну від існуючих раніше напрямків збільшення міцності конструкційних матеріалів шляхом легування та зміни фазового складу нанотехнологічний підхід заснований на формуванні матеріалів нанокристалічної будови, що забезпечує суттєве збільшення механічних властивостей та формування сприятливого співвідношення між міцністю та пластичністю.

На основі створення наноматеріалів можливе розширення діапазону міцності конструкційних матеріалів, як за рахунок об'ємних (компактних) наноструктурних матеріалів з високою щільністю дефектів кристалічної будови на межах зерен, одержуваних переважно методами інтенсивної пластичної деформації, і за рахунок створення практично бездефектних наноматеріалів (нанотрубок). З урахуванням того, що щільність одношарових вуглецевих нанотрубок у 5 разів менша за щільність сталі, а міцність більша, ніж у 20 разів, питома міцність нанотрубок може більш ніж у сто разів перевищувати аналогічний параметр для сталі. Це відкриває широкі перспективи для використання даного матеріалу як конструкційного у тих галузях, де проблеми підвищення вагової ефективності найбільш актуальні – авіації, космічній техніці, будівництві тощо.

Поєднання високої міцності та пластичності, а також прояв ефекту надпластичності в наноматеріалах, забезпечує можливість їх ефективної обробки тиском та отримання на їх основі деталей та виробів складної форми для застосування у різних галузях. Наноматеріали конструкційного призначення можуть бути металевими, керамічними, полімерними, композиційними. Багато груп конструкційних наноструктурних матеріалів є багатофункціональними. Крім використання для елементів конструкцій, корпусних та інших елементів, основною вимогою до яких є високі властивості міцності, дані матеріали завдяки різноманітним фізико-хімічним, експлуатаційним властивостям можуть мати різні сфери застосування.

2.7 Нанотехнології в машинобудуванні

Основними напрямками, у яких може бути досягнуто значного ефекту в машинобудуванні завдяки застосуванню нанотехнологій, є наступні.

1. Збільшення ресурсу різальних та обробних інструментів на основі застосування наноструктурних інструментальних матеріалів, інструментів із покриттями.
2. Широке впровадження нанотехнологічних розробок у модернізацію парку високоточних та прецизійних верстатів.
3. Створення з використанням нанотехнологій методів вимірювання та позиціонування, які забезпечать адаптивне управління різальним інструментом на основі оптичних вимірювань оброблюваної поверхні деталі та обробної поверхні інструменту безпосередньо в ході технологічного процесу.
4. Значне збільшення ресурсу роботи та покращення сукупності технічних показників (витрати палива, зниження шуму та шкідливих викидів) автотранспорту за рахунок застосування наноматеріалів, більш точної обробки та відновлення поверхонь.
5. В електронному та електротехнічному машинобудуванні – розширення можливостей радіолокаційних систем на основі наноструктур та волоконно-оптичних ліній зв'язку з підвищеною пропускнуою здатністю з використанням фотоприймачів та

інжекційних лазерів на структурах із квантовими точками; вдосконалення тепловізійних оглядово-прицільних систем на основі використання матричних фотоприймальних пристроїв, виготовлених на базі нанотехнологій та відмінних високою температурною роздільною здатністю; створення потужних економічних інжекційних лазерів на основі наноструктур для накачування твердотільних лазерів, що використовуються у фемтосекундних системах.

6. В енергетичному машинобудуванні – вдосконалення технології створення паливних та конструкційних елементів, підвищення ефективності існуючого обладнання та розвитку альтернативної енергетики.

2.8 Основні області застосування наноматеріалів і нанотехнологій

Високі значення механічних властивостей, зносостійкості, термостійкості наноматеріалів забезпечують можливість створення на їх основі нових класів інструментальних матеріалів - вільних абразивів з урахуванням нанопорошків, зокрема алмазних; алмазно-абразивного інструменту із введенням нанотрубок до складу зв'язки; високотвердих матеріалів на основі фулеренів та нанотрубок для виробництва прецизійних інструментів для різних методів випробування матеріалів; наноструктурних зносостійких покриттів для різального та штампового інструменту тощо.

Наноструктурна кераміка, отримана компактуванням нанопорошків речовин різної фізико-хімічної природи, в порівнянні з традиційною, має суттєві переваги, насамперед, підвищену пластичність, технологічність і може бути застосована як перспективний конструкційний матеріал в авіабудуванні, машинобудуванні, медицині, побутовій техніці і т.д., а також як інструментальний матеріал з високим рівнем механічних та експлуатаційних властивостей.

Нанопористі матеріали з програмованим характером розподілу та розміром нанопор складають окремих, дуже важливий клас наноструктурних матеріалів і можуть мати широке застосування як фільтри, сепаратори та контейнери для зберігання газоподібних

продуктів, палива, лікарських препаратів; молекулярних сит для ізотопного поділу елементів; у харчовій та фармацевтичній промисловості та ін.

Магнітні властивості наноструктур мають велику різноманітність і значно відрізняються від традиційних матеріалів, що обіцяє створення цілого ряду магнітних матеріалів з принципово новими властивостями для застосування в електротехніці та електроніці, у техніці магнітного запису та відображення інформації, принципово нових підходах формування структури жорстких дисків, у машинобудуванні, будуванні літаків та космічній техніці, у металургії та енергетиці, у медицині тощо.

В області мікроелектроніки, розвиток якої безпосередньо пов'язаний із зменшенням розміру функціональних елементів, застосування нанотехнологій дозволяє поліпшити в тисячі та мільйони разів швидкодію, обсяг пам'яті та функціональність електронних пристроїв і так само знизити їх розміри, масу, енергоємність, тепловиділення. Крім того, нанотехнології забезпечують створення широкого спектра електронних приладів, виробництво яких іншими засобами неможливе.

Проблеми мініатюризації, підвищення ефективності фотонних пристроїв, у тому числі волоконно-оптичних систем зв'язку, які є найважливішим елементом комунікаційних та інформаційних технологій у різних галузях, можуть бути вирішені значною мірою завдяки використанню наноефектів та наноматеріалів.

Пріоритетними областями застосування нанотехнологій, де вже досягнуто значних успіхів, є біотехнологія та медицина. Основними напрямками застосування нанотехнологій у медицині є: розробка нанодіагностичних експресних лабораторій, адресна доставка ліків, створення нанороботів для діагностики та лікування на клітинному рівні, а також засобів моніторингу організму, нових лікарських препаратів клітинного рівня, наноімплантатів тощо.

Прогрес в машинобудуванні, обумовлений застосуванням нанотехнологій, може бути пов'язаний з підвищенням прецизійності механічної обробки і, відповідно, точності та якості деталей, що отримуються, підвищенням експлуатаційних характеристик машин. Це зумовлено застосуванням нових класів інструментальних та конструкційних матеріалів, розробкою прецизійного верстатного обладнання, адаптивного управління різальним інструментом

безпосередньо в ході технологічного процесу, розширенням можливостей радіолокаційних систем управління на основі наноструктур та волоконно-оптичних ліній зв'язку тощо.

Найбільші перспективи застосування нанотехнологій в енергетиці: синтез нових матеріалів для створення пристроїв, призначених для транспортування та зберігання енергії; розробка нових джерел енергії, паливних елементів, у тому числі атомних електростанцій; створення «розумних» глобальних енергомереж, підвищення ефективності перетворювачів сонячної енергії та ін.

Основні розробки у будівництві, пов'язані з нанотехнологіями, спрямовані на створення нових, міцних, легких та дешевих будівельних матеріалів, які забезпечать будівлі та споруди сейсмо- та вібростійкістю, захистом від несприятливої екологічної обстановки. Нові технології принесуть до архітектури раніше недоступні форми, дозволять створити «розумні», ресурсоекономні, екологічно безпечні споруди, що забезпечують сприятливі умови для проживання та життєдіяльності.

Напрямки використання нанотехнологій для сільського господарства пов'язані з відтворенням сільськогосподарських видів, переробкою кінцевої продукції та покращенням її якості.

Достатньо широкі можливості застосування нанотехнологій у військовій сфері - від нових видів озброєння, розвідувальних систем контролю, систем маскування, засобів зв'язку, особистого обмундирування та засобів захисту.

Приклади можливого вирішення екологічних завдань за допомогою нанотехнологій: контроль екологічної обстановки за допомогою багатофункціональних сенсорів, очищення вод, використання екологічно чистих, відновлюваних джерел енергії, боротьба з парниковим ефектом.

3 ЛАЗЕРНА ОБРОБКА

Лазерна обробка є одним з прогресивних методів поверхневого зміцнення деталей машин і інструментів. У цьому методі локальну ділянку поверхні виробу, за допомогою випромінювання оптичних квантових генераторів (лазерів), нагрівають до надкритичних

температур, після чого оброблювана ділянка охолоджується з великою швидкістю за рахунок інтенсивного тепловідведення у внутрішні шари металу. Поверхнева лазерна обробка - це локальне нагрівання, локальне плавлення чи локальне випаровування матеріалу, що обробляється за рахунок впливу тепла, поглинутого матеріалом в місці впливу лазерного променя. Залежно від величини щільності потужності лазерного впливу, матеріал може нагрітися, розплавитися чи випаруватися. Щільність потужності – це величина потужності, віднесена до одиниці площі, зазвичай, квадратному сантиметру. Більшість металів випаровується при щільності потужності, що перевищує кілька мільйонів ват на квадратний сантиметр. Застосування лазерного випромінювання є ефективним в авіаційній та автомобільній промисловості, в спеціальних галузях, пов'язаних із застосуванням важкооброблюваних матеріалів.

3.1 Основні фізичні процеси лазерних технологій

При взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною відбувається ряд теплофізичних процесів, які схематично представлені на рис. 3.1. Характер цих процесів, а отже, і результат цієї взаємодії сильно залежать від коефіцієнта поглинання матеріалу на довжині хвилі випромінювання лазера, його пікової потужності і тривалості впливу на матеріал.

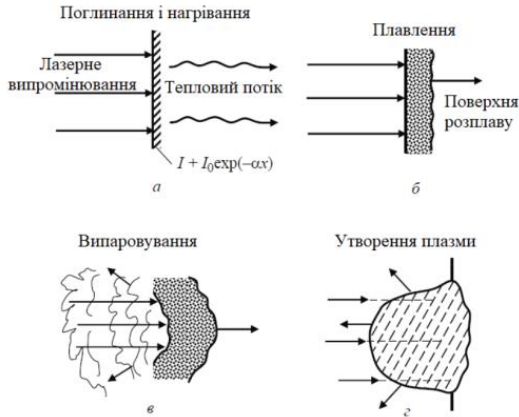


Рисунок 3.1 - Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною

Лазерне випромінювання, падаючи на оброблювану поверхню, поглинається, тепло, що при цьому виділилось, поширюється в глиб матеріалу за рахунок теплопровідності (рис. 3.1, а). Далі відбувається його нагрівання, а після того, як температура поверхні досягає точки плавлення, починається поширення межі рідкої фази в глиб матеріалу (рис. 3.1, б). При подальшому опроміненні матеріалу триває процес нагріву, на цей раз - до температури випаровування (кипіння). Після досягнення цієї температури ініціюється процес випаровування речовини з оброблюваної поверхні (рис. 3.1, в), що супроводжується іонізацією поверхневих домішок і забруднень, які практично завжди присутні в тому чи іншому вигляді. Далі випромінювання поглинається основним матеріалом, і, якщо інтенсивність недостатньо висока, матеріал плавиться, випаровується, а пари іонізуються. При цьому тиск парів сприяє виплескуванню розплаву і в матеріалі поступово формується отвір. Якщо інтенсивність випромінювання надто велика, то в результаті випаровування утворюється високотемпературна непрозора плазма. Новоутворена плазма може поширюватися назустріч лазерному пучку в формі індукованої лазером хвилі поглинання. Хмара плазми поглинає падаюче лазерне випромінювання і екранує поверхню зразка, перешкоджаючи тим самим подальшому впливу лазера на речовину (рис. 3.1, г). Це негативний ефект і його потрібно уникати в процесі лазерної обробки

матеріалів. При побудові будь-якого технологічного процесу, що реалізується за допомогою лазера, необхідно враховувати теплофізику лазерного нагрівання.

3.2 Технологічні процеси лазерної обробки матеріалів

Лазерною обробкою вдається реалізувати широке коло технологічних процесів і методів обробки матеріалів – різання, зварювання, свердління, наплавлення, маркування і інше. Застосовуються наступні види обробки лазером: різання листового матеріалу по складному контуру, прошивання отворів, зварювання, розмітка, маркування, поверхнева термічна обробка (гарт, відпуск) та інше. За допомогою променя лазера найбільш часто обробляють тонколистові сплави заліза, титану, нікелю, кераміку, а також пластмасу, дерево, тканини, різні композиційні сполуки.

3.2.1 Лазерне різання

Лазерне різання - технологія термічного різання й розкроювання матеріалів, при якій як джерело енергії використовується лазер високої потужності. Сфокусований лазерний промінь, керований системою числового програмного керування забезпечує високу концентрацію енергії й дозволяє розтинати практично будь – які матеріали незалежно від їх теплофізичних властивостей. Випромінювання, з енергетичними параметрами які достатні для використання лазерів при технологічних процесах розрізання (розкроювання), має діапазон довжини хвиль від 0,4 до 10,6 мкм. Зокрема, для різання різних матеріалів найбільший ефект дає довжина хвилі 10,6 мкм, яка генерується газовими CO₂-лазерами з активним середовищем суміші вуглецевого газу з азотом і гелієм. Випромінювання з цією довжиною хвилі добре поглинається більшістю неметалічних матеріалів і у дещо меншій мірі металевими сплавами. Матеріали з великим коефіцієнтом відбивання (мідь, алюміній) гірше піддаються лазерному різанню. При лазерному

різанні відсутній механічний вплив на оброблюваний матеріал і виникають мінімальні деформації, що дозволяє здійснювати обробку з високою точністю, в тому числі нежорстких заготовок. Завдяки великій щільності потужності лазерного випромінювання забезпечується висока продуктивність процесу обробки в поєднанні і високою якістю поверхонь. Легке і порівняно просте управління лазерним променем дозволяє здійснювати обробку по складному контуру плоских та об'ємних заготовок з високим ступенем автоматизації процесу.

Лазерне різання металу засноване на принципі концентрації лазерного променя на поверхні оброблюваної деталі. Промінь лазера концентрується на поверхні деталі на площі, яку можна обчислити квадратними мікронами, і створює область підвищеної температури. В результаті впливу променя поверхня деталі розігрівається, розплавляється і випаровується. Сфокусоване лазерне випромінювання дозволяє різати практично будь-які метали і сплави, незалежно від їх теплофізичних властивостей. При лазерному різанні відсутній механічний вплив на оброблюваний матеріал і виникають незначні деформації. Внаслідок цього можна здійснювати лазерну різку з високою точністю, в тому числі і нежорстких деталей, що легко деформуються. Завдяки великій потужності лазерного випромінювання забезпечується висока продуктивність процесу різання. При цьому досягається така висока якість різку, що в отриманих отворах можна нарізати різьбу. Лазерне різання може застосовуватись до більшості видів сталі у будь-якому стані у тому числі з покриттям, титану та його сплавів, цирконію, ніобію, танталу, нікелю і сплавів цих та інших кольорових металів. Також, обробці піддаються і неметали, такі як деревина, пластмаси, шкіра, гума, натуральні та синтетичні тканини. Крім того можливе різання неорганічних матеріалів: кераміки, кварцу, порцеляни, скла, азбесту, графіту, тощо.

Лазерне різання має низку очевидних переваг перед багатьма іншими способами розрізування та розкрою а саме:

- мала ширина різку і невелика глибина зони термічного впливу;
- відсутність механічного контакту дозволяє обробляти крихкі і деформовані матеріали;
- обробці легко піддаються матеріали з твердих сплавів;

- можливим є високошвидкісне різання тонколистової сталі, що збільшує перспективи використання у багатосерійному виробництві;
- відсутність шкідливих відходів при різанні склопластиків;
- висока ефективність у дрібносерійному виробництві;
- оплавлення країв розрізу синтетичних текстильних матеріалів запобігає їх розпусканню.

Схема головки для лазерного різання приведена на рис. 3.2. У корпусі 9 головки розміщений твердотільний або газовий CO_2 -лазер 1 потужністю 2,3...6 кВт. Лазерний промінь 2 відбивається від дзеркала 3, проходить через фокусуючу систему 4 і прозоре вікно 5 газової камери 6. Необхідна конфігурація різку забезпечується переміщеннями корпусу 9 головки.

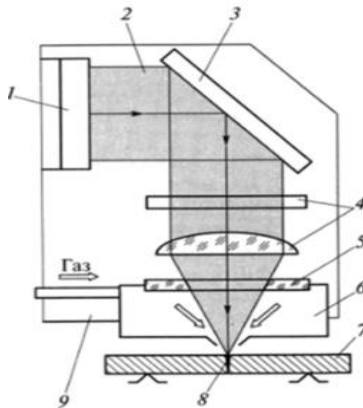


Рисунок 3.2 - Схема головки для лазерного різання:

1 – лазер; 2 – лазерний промінь; 3 – дзеркало; 4 – фокусуюча система;
5 – вікно; 6 – камера; 7 – деталь, 8 – лінія різання; 9 – корпус

3.2.2 Лазерне зварювання

Лазерне зварювання - один із видів зварювання плавленням, при якому джерелом тепла для розплавлення частин з'єднання є енергія світлового променя, одержана від оптичного квантового генератора -

лазера. Джерелом світлового випромінювання є оптичний квантовий генератор (ОКГ) - лазер. Робота ОКГ заснована на принципі стимульованого генерування світлового випромінювання. Для пуску лазера необхідне потужне джерело світлової енергії (наприклад, ксенонова лампа).

Схема рубінового лазера наведена на рис. 3.3. Рубіновий стрижень 4 встановлений в корпусі лазера. Торці стрижня строго паралельні один одному і перпендикулярні його осі. Лівий торець покритий непрозорим шаром срібла, правий - шаром срібла з коефіцієнтом пропускання світла 8%. Джерелом світла, що застосовуються для збудження атомів хрому, є ксенонова імпульсна лампа 3. Лампа живиться від батареї 1 конденсаторів. При включенні лампи пускачем 2 енергія конденсаторів перетворюється в світлову енергію. Світловий потік лампи фокусується на рубіновому стрижні відбивачем 7, внаслідок чого порушуються атоми хрому. Вони випромінюють фотони з довжиною хвилі 0,6943 мкм. Лавиноподібний потік фотонів багаторазово відбивається від дзеркальних торцевих поверхонь рубінового стрижня і, проходячи через правий торець, фокусується оптичною системою 5 на заготівлі 6. Сила окремого імпульсу невелика, але вона виділяється за 1 мкс на площі 0,01 мм². У фокусі променя забезпечується температура 6000...8000⁰С, тому в місці попадання променя на поверхню заготовки метал миттєво нагрівається і випаровується. Найбільш часто використовуються для зварювання лазери, що випромінюють світло з наступними значеннями довжини хвилі, мкм: рубіновий - 0,6943; на склі з неодимом – 1,06; гелій-неоновий – 0,6328; CO₂-лазери - 10,6 мкм. Чим менше довжина хвилі лазерного випромінювання, тим більше його здатність безперешкодно проходити через речовину.

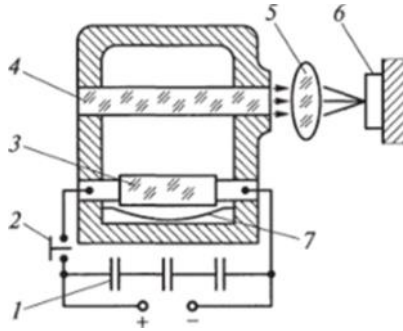


Рисунок 3.3 - Схема рубінового лазера:

- 1 – батарея конденсаторів; 2 – пускач; 3 – ксенонова імпульсна лампа;
 4 – рубіновий стрижень; 5 – оптична система; 6 – заготовка;
 7 – відбивач прозорий

Направлене на поверхню заготовки лазерне випромінювання частково відбивається від неї і частково поглинається матеріалом заготовки. Поглинання випромінювання призводить до появи як на поверхні, так і на деякій глибині інтенсивного джерела теплоти. При цьому в плямі нагріву починається локальне випаровування металу, і в розплавленому металі 2 (рис. 3.4) утворюється порожнина 3. Тиск пару випаровуваного металу заготовки 1 не дозволяє цій порожнині зачинитися під дією гідростатичного тиску в розплаві. При відповідній швидкості переміщення лазерного променя 4 (швидкості зварювання) утворена порожнина набуває динамічну стійкість і рухається разом з променем. Перед порожниною відбувається плавлення металу, а за нею - затвердіння. При переміщенні лазерного променя розплавлений метал під дією тиску парів і внаслідок різниці сил поверхневого натягу в центральній і хвостовій частинах зварювальної ванни відтісняється в її хвостову частину. Після проходження променя порожнина заповнюється рідким металом, і утворюється вузький зварений шов 5, глибина якого значно більше його ширини.

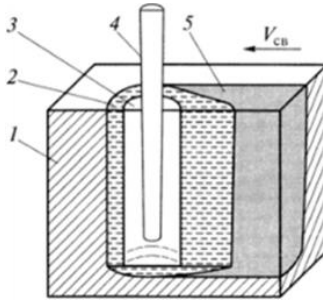


Рисунок 3.4 – Схема лазерного зварювання:

1 – заготовка; 2 – розплавлений метал; 3 – порожнина; 4 – лазерний промінь; 5 – зварні шви

Незалежно від призначення і типу застосовуваного лазера в технологічній установці (рис. 3.5) містяться такі системи: джерело 1 потужного оптичного випромінювання; оптична система 6 для формування лазерного променя (в неї може входити підсистема для переміщення променя по заданій траєкторії); пристрій 5 для регулювання і модуляції лазерного випромінювання; система 11 спостереження; система 16 базування, закріплення і переміщення заготовок; система управління 18. Джерело випромінювання - технологічний лазер - складається з джерела живлення 2, випромінювача 3 і системи 4 охолодження. Технологічний лазер повинен генерувати випромінювання потужністю, достатньою для проведення зварювання з необхідною продуктивністю і мінімальним тепловим впливом на зону біля шва. Для зварювання заготовок товщиною до 1 мм застосовують твердотільні лазери, так як вони забезпечують малі втрати потужності, прості в експлуатації, мають невеликі габарити і масу. При зварюванні заготовок великої товщини використовують газові лазери переважно на основі CO_2 . Вони довговічні і забезпечують високий рівень вихідної потужності.

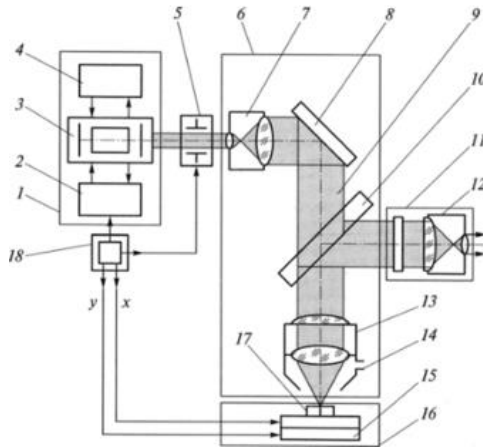


Рисунок 3.5 - Структурна схема лазерної технологічної установки:

1 – джерело випромінювання; 2 – джерело живлення;
 3 – випромінювач; 4 – система охолодження; 5 – пристрій для регулювання і модуляції лазерного випромінювання; 6 – оптична система; 7 – об'єктив оптичної системи; 8 – металеве дзеркало;
 9 – лазерне випромінювання; 10 – розщеплювач променя;
 11 – система спостереження; 12 – об'єктив системи спостереження; 13 – фокусуєча система; 14 – спеціальне сопло;
 15 – координатний стіл з приводом; 16 – система базування, закріплення і переміщення заготовок; 17– заготовка; 18 – система управління; x, y – інформаційні сигнали координат переміщення столу

Оптична система виконує наступні функції: передача лазерного випромінювання 9 в зону обробки, формування променя необхідної потужності і конфігурації, а також наведення променя на задану ділянку оброблюваної поверхні. До складу оптичної системи входять прозорі оптичні пристрої (об'єктив оптичної системи 7, об'єктив фокусуєчої системи 13), металеве дзеркало 8 і розщеплювач 10 променя. Прозорі оптичні пристрої використовують при потужності лазера до 3 кВт. При потужності понад 3 кВт застосовують металеві дзеркальні фокусуєчі системи, що мають значно більший термін служби. Система 11 дозволяє спостерігати за ходом зварювання і проводити ручне наведення променя на зону зварювання, система управління – переміщати заготовки в процесі

зварювання і при наявності відповідних датчиків і негативного зворотного зв'язку коригувати параметри випромінювання.

3.2.3 Лазерне свердління

Лазерне свердління - лазерна технологія обробки матеріалів, при якій з використанням сфокусованого лазерного променя всередину заготовки локально передається така кількість енергії, що в результаті відбувається розплавлення і часткове випаровування матеріалу цієї заготовки. Цим методом виконуються отвори діаметром 0,003...1 мм при відношенні глибини до діаметра від 0,5 до 10. Продуктивність прошивання малих отворів може досягати десятків і навіть тисяч на секунду. Особливо ефективним є оброблення мікро - та наноотворів у деталях із надтвердих матеріалів з низькою теплопровідністю. Основними процесами при лазерному свердлінні матеріалів, так само як і при лазерному різанні, є розігрів, плавлення і випаровування із зони лазерного опромінення. Для того щоб забезпечити дані процеси, необхідно мати щільності потужності $10^6...10^9$ Вт/см², які створюються оптичною системою у фокальній плямі. У процесі свердління при поглибленні отвору іонізована пара (плазма) витискається назовні за рахунок різниці тисків між зовнішнім середовищем і внутрішнім простором отвору.

Преваги:

- безконтактність обробки без прикладання зусилля до самої заготовки;
- можливість застосування лазерного свердління для виконання отворів у важкодоступних місцях (наприклад, в паливних форсунках), завдяки використанню дрібної оптики;
 - мінімальне теплове навантаження і відсутність потреби в охолоджувальній рідині;
 - добрі умови для автоматизації процесу;
 - технологічна гнучкість;
 - можливість виготовлення отворів мінімального діаметра (приблизно від 40 мкм), які практично не піддаються традиційному механічному свердлінню або зовсім не можуть бути виконані з його допомогою.

Недоліки:

- переважно вища порівняно з традиційними методами вартість свердління;
- значні порівняно з традиційними методами енергозатрати, а значить низький ККД.

Лазерне свердління широко застосовують для отримання отворів не тільки в твердих і надтвердих матеріалах, але і в матеріалах, що відрізняються підвищеною крихкістю. До матеріалів, що підлягають свердлінню з допомогою променя лазера, належать такі неметали, як алмази, рубінові камені, ферити, кераміка тощо, свердління отворів у яких звичайними методами становить певні труднощі чи є малоефективним.

Ця технологія забезпечує отримання отворів:

- у крилах літаків для відсмоктування приграничного шару повітряного потоку при обтіканні;
- в лопатках турбін для їх повітряного охолодження;
- у форсунках для дизельних двигунів автомобілів;
- у виробках з листового металу, що мають тонку геометрію.

3.2.4 Лазерна поверхнева обробка

Зміцнювальна лазерна поверхнева обробка (лазерне гартування) - напрямок, який активно розвивається у світовій практиці і являє собою достатньо простий спосіб підвищення твердості та зносостійкості поверхневого шару матеріалу в 2...3 рази без термічного деформування виробів, типового для традиційних методів термообробки. Використання різних видів лазерного зміцнення у машинобудуванні і приладобудуванні дає можливість істотно скоротити витрати дефіцитних високолегованих сталей при виготовленні відповідальних деталей машин, інструментів, підвищити надійність та довговічність виробів. На відміну від відомих процесів і методів термозміцнення гартуванням, нагрівання при лазерній термообробці є не об'ємним, а поверхневим. Можливе керування товщиною зони гартування в широких межах завдяки зміні інтенсивності випромінювання та тривалості його дії. Ефект зміцнення при лазерному впливі на металеві матеріали

спостерігається внаслідок надвисоких швидкостей нагрівання і наступного охолодження матеріалу зі значними температурними градієнтами, часткового легування поверхневого шару елементами навколишнього середовища, зростання щільності дислокацій в зоні опромінення і т. д. В матеріалі при таких умовах відбуваються структурні і фазові перетворення, що супроводжуються утворенням специфічної ультрадисперсної однорідної (гомогенної) структури з унікальними властивостями. Лазерне гартування ефективно застосовується для більшості вуглецевих і легованих сталей, чавунів, для ряду кольорових сплавів.

Основними видами лазерного зміцнення, що реалізуються залежно від щільності потужності лазерного випромінювання та швидкості охолодження, є наступні: зміцнення без фазового переходу, зміцнення з фазовим переходом, лазерне легування, наплавлення, аморфізація поверхні, «шокове» зміцнення. Наслідком лазерного зміцнення є покращення багатьох експлуатаційних показників опромінених матеріалів – зносостійкості, теплостійкості, їх механічних характеристик, сприятливий розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалів, тобто тих параметрів, які визначають триботехнічні властивості контактуючих поверхонь, надійність і довговічність виробів машинобудування.

Найбільш поширена сфера застосування лазерного зміцнення - інструментальне виробництво (зміцнення поверхні різців, фрез, свердел, елементів штампового оснащення), зміцнення робочих поверхонь деталей машин і приладів, у тому числі великогабаритних деталей хімічного та енергетичного машинобудування. Висока швидкість охолодження забезпечує ефект гартування і зміцнення поверхні, при цьому властивості глибинних шарів залишаються незмінними. Звідси випливає, що лазерна обробка найбільш ефективна для таких видів виробів, які не вимагають крізного гартування, наприклад, колінчасті вали, шестерні, гільзи циліндрів, ріжучий інструмент та ін.

3.2.5 Лазерне маркування

Лазерне маркування є популярним методом створення постійних міток на різних матеріалах (рис. 3.6). Даний метод може використовуватися на всьому, від металу та дерева до пластику та скла, і він витримує пост-обробку для чудової відстежуваності та довговічності. Виняткова швидкість та висока контрастність роблять лазерну технологію ідеальною для маркування у різних галузях промисловості. Лазерне маркування та лазерне гравіювання взаємозамінні, існують способи як гравіювати матеріали, так і маркувати їх поверхню.



Рисунок 3.6 – Лазерне маркування

Лазерне маркування засноване на абляції матеріалу, тобто видаленні, за допомогою лазера та високої температури. Лазер фокусує тепло на поверхні матеріалу та вирізує щілини за потрібним малюнком. В результаті виходить висококонтрастний постійний малюнок, який залишається читаним навіть після зносу або обробки поверхні. Лазерне маркування працює з широким спектром матеріалів та створює довговічний розріз. Він ідеально підходить для програм, де ідентифікаційна інформація повинна залишатися на місці протягом багатьох років, навіть у складних умовах. Наприклад, після багатьох років впливу агресивних хімікатів, вологи та бруду ви все одно зможете прочитати вигравіровану лазером табличку з технічними даними, прикріплену до промислового обладнання. Сканер штрих-коду також зможе прочитати його завдяки високому контрасту, отриманому в результаті цього процесу.

Лазерне маркування металу - це необхідний етап виробничого процесу, без якого контроль якості деталей та вузлів ускладнюється, а іноді стає неможливим. Маркування дозволяє дізнатися про характеристики та параметри елемента, що служить гарантією якості. Лазерне маркування, яке забезпечує чіткість написів, не ушкоджує

поверхні вузлів та деталей, не залишає подряпин чи сколів. Це один із найбільш гнучких та сучасних методів, що застосовуються в промисловості. Автоматизовані верстати для маркування забезпечують повний контроль процесу, визначають інтенсивність променя. На відміну від механічного гравіювання, лазерне маркування впливає локально, не залишаючи слідів на поверхнях поряд із маркерами. Процедура виконується у стислий термін. Ще одна перевага лазерного маркування - воно дозволяє нанести маркери на вигнуті та внутрішні поверхні деталей, на елементи складної геометрії. Для нанесення маркерів використовують два типи лазерів:

- твердотільні - мають високу потужність, можуть генерувати потужні імпульси, застосовуються для маркування незабарвлених металів, сталі, тугоплавких сплавів;
- CO₂ - менш потужні установки, які використовують для маркування пофарбованих та неметалевих виробів.

Лазерне гравіювання та лазерне травлення взаємозамінні. Незважаючи на те, що вони схожі, це два різні методи. Основна відмінність у тому, наскільки глибокими є розрізи. Травлення дрібніше і змінює форму матеріалу. Хоча при травленні також використовується лазер, він тільки розплавляє матеріал на поверхні, що змушує його розширюватися і набувати грубішої текстури. Це також впливає на його відбивну здатність та збільшує контрастність. Гравіювання та травлення можуть використовуватися разом для додаткового розмаїття. Наприклад, якщо чистий метал особливо темний, гравіювання може бути недостатньо темним, щоб забезпечити контраст, необхідний для читання. Травлення може додати більш світлі мітки до негравіюваної частини збільшення контрасту. Одна з причин популярності лазерного маркування полягає в тому, що можна використовувати її на різних матеріалах.

Матеріали для лазерного гравіювання.

Метали. Маркування можливе практично на будь-якому металі, у тому числі на сталі, алюмінію, сріблі та золоті. Оскільки маркування витримує пост-обробку, ви можете обробляти метали для різних цілей і зовнішнього вигляду після різання. Для випаровування деяких металів потрібні вищі температури, тому при виборі лазерного верстата слід враховувати властивості металу. Наприклад, для титану точка випаровування 3260⁰С, тоді як срібла всього 1950⁰С.

Пластмаси. Пластмаси, такі як акрил і поліоксиетилен, використовуються в різних продуктах, що піддаються маркуванню, завдяки різноманітним кольорам і фізичним характеристикам.

Фанера та ДВП, МДФ. Вироби з дерева мають природний, світлий вигляд та добре піддаються маркуванню.

Скло. Багато типів скла можна маркувати для отримання ефектів, які відмінно підходять для пакування продуктів та рекламних матеріалів.

Шкіра. Шкіра жорстка і не завжди добре піддається механічному гравіюванню, але лазери її швидко прорізають.

Камінь. Лазерне маркування на камені може бути використане для проектів, таких як вирізання логотипу на плитці.

Лазерне маркування має низку переваг над іншими методами маркування, такими як точкова обробка. Точкова обробка, також звана штампуванням шпильками або маркуванням шпильками, використовує маленькі тверді шпильки для створення заглиблень на поверхні матеріалу. Ці крихітні отвори роблять поверхню більш шорсткою і змінюють її відбивну здатність. Хоча машини для точкової обробки дешевші, ніж лазери, лазерні маркери можуть дати набагато кращі результати. З причин, з яких лазерне маркування перевершує точкову обробку.

Якість маркування. Точкова обробка менш контрастна і може бути важко прочитаною. Сканери штрих-коду можуть потребувати певних умов освітлення для зчитування точкового штрих-коду. Лазерне маркування забезпечує більш послідовне та докладне маркування з меншим відсотком шлюбу.

Технічне обслуговування. На відміну від обладнання для точкової обробки лазери не передбачають контакту між обладнанням і поверхнею. Вони практично не схильні до механічного зносу і не мають деталей, що вимагають регулярної заміни, таких як штифти з точковим ударом.

Швидкість. Лазери швидше, ніж машини для точкової обробки, щоб відповідати більш вимогливим періодам циклу.

Варіанти маркування. Оскільки точкове маркування забезпечує нижчу контрастність, воно не підходить для деяких міток, таких як одновимірні штрих-коди. Більшість маркувань, завданих точковим ударом, також будуть знищені будь-якою додатковою обробкою поверхні, тоді як лазерна обробка залишиться читаною.

Матеріали. Завдяки більшій кількості варіантів конфігурації, лазерне маркування може застосовуватися для більш широкого спектру матеріалів.

Безперечними перевагами лазерного маркування є такі:

мініатюрність знаку (ширина лінії знаку становить 10 мкм при розмірах самого знака до декількох десятків мікрометрів);

відсутність механічного впливу на виріб внаслідок безконтактності методу обробки, що дозволяє маркувати тонкостінні, крихкі деталі, вузли і вироби у збірці;

високі точність і якість нанесення знаків, що гарантує надійність і стабільність їх зчитування фотоелектронними пристроями;

висока продуктивність процесу;

довговічність і стійкість до зовнішніх впливів, наприклад, до механічного навантаження і коливань температури;

екологічна чистота.

можливість маркування виробів складної форми, а також одночасно на зовнішній та внутрішній поверхні виробу;

можливість повної автоматизації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

Основна література

1. Комісаров, О.О. Пост-обробка деталей фрезеруванням на верстаті з ЧПК після 3D друку методом наплавлення // О.О. Комісаров, Г.В. Пухальська, С.І. Дядя // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №1. – 2024.- С. 31-40.
2. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl et al. // Chem. Rev., 2017. 117, 15 С. 10212– 10290. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
3. Адитивна технологія: опис, визначення, особливості застосування та відгуки. Адитивні технології в промисловості Режим доступу:<http://poradu.pp.ua/tehnka-tehnologyi/35539-aditivna-tehnologya-opis-viznachennya-osoblivost-zastosuvannya-ta-vguki-aditivn-tehnologyi-v-promislovost.html>.
4. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
5. Кузнецов, В. Е. CAD/CAM/CAE / В. Е. Кузнецов. Observer, 2003. №4 (13).С. 2-7.
6. 3D Printing: Understanding Additive Manufacturing, Andreas Gebhardt, Julia Kessler, Laura Thurn, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2018. – 204 p.
7. Komisarov O. FDM 3D-printing // G. Pukhalska / Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма X Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 18–21 квітня 2023 р.) – Суми: Сумський державний університет, 2023. –с. 57-59.
8. Williams, L. Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. / L. Williams. McGraw-Hill Education. 2016. 459 p.
9. Turner, B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes / B. N. Turner, R. Strong, A. Scott // Gold Rapid Prototyping Journal, 0(3), 2014. p. 192–204.
10. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead / L. David, Joseph

Bourella, Jr.a, Beaman, C. Leub, Ming, W., David. RosencRapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009. Istanbul.

11. Kazemi, M. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts / M. Kazemi, A. Rahimi // *Rapid Prototyping*, 21, 2015, p. 79–88.

12. Jacobs, P.F. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography* / P.F. Jacobs. Society of Manufacturing Engineers, New York, U.S. 1993. 434 p.

13. Zhang, X. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures / X. Zhang, X. Jiang, C. Sun // *Sensor Actuat A–Phys.*, 2009. p. 77–149.

14. *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*, Rafiq Noo-rani, CRC Press, 2017. – 271 p.

15. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, David Ian Wimpenny, Pulak M. Pandey, L. Jyothish Kumar, Springer, 2016. – 186 p.

16. Mandrycky c. Et al. 3D bioprinting for engineering complex tissues // *biotechnology advances*. – 2016. – т. 34. – №. 4. – с. 422-434.

17. Комісаров О.О. Матеріали для FDM-друку в Україні [Електронний ресурс] // О.О. Комісаров, Г.В. Пухальська / Тиждень науки-2023. Машинобудівний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р., НУЗП. – Запоріжжя, 2023. – С. 43-45 - 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).- Електронне видання комбінованого використання на DVD-ROM.

18. Chryssolouris G. *Laser Machining: Theory and Practice (Mechanical Engineering Series)* / G. Chryssolouris . – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH, 2013.

19. Конспект лекцій з дисципліни «Формування структури і властивостей при лазерній поверхневій обробці» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання / Укл.: Косинська О.Л. – Кам'янське, ДДТУ, 2019 р., 47 с.

20. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.

21. Корж В. М. Газотермічна обробка матеріалів: Навчальний посібник. — К. : Екотехнологія, 2005. — 195 с. — ISBN 966–8409–07–

22. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с.
23. Електронний ресурс: <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
24. Електронний ресурс: <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament>
25. Електронний ресурс: <http://um.co.ua/9/9-5/9-58101.html>
26. Електронний ресурс: https://stud.com.ua/157941/tehnika/lazerne_rizannya

Додаткова література

27. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
28. Введение в нанотехнологии: текст лекций для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения / А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2012. – 272 с.