

Калюжний О.Б.¹,
Платков В.Я.²
Марченко М.М.¹

¹ Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна,
E-mail: albokal@ukr.net
kmmarchenko1208@gmail.com

² Східноукраїнський
національний університет
імені Володимира Даля,
м. Київ, Україна,
E-mail: vplatkov@gmail.com

**МЕТОДИ ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ ТА
МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ АСПЕКТИ В
АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ
МЕТАЛІВ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-30>

УДК 004.896

*Калюжний О.Б., Платков В.Я., Марченко М.М. **Методи лазерного спікання та матеріалознавчі аспекти в адитивному виробництві металів: аналітичний огляд***

***Анотація.** У статті представлено огляд сучасних лазерних 3D-технологій обробки металевих матеріалів, що є одним з провідних напрямів адитивного виробництва. Розглянуто фізичні принципи взаємодії лазера з металевим порошком, механізми плавлення та затвердіння, а також важливість моніторингу процесів in-situ для забезпечення якості. Узагальнено основні методи лазерного 3D-друку металів (SLS, SLM, DMLS, DED/LENS), наведено їхні переваги, обмеження та сфери застосування. Особливу увагу приділено вимогам до металевих порошків, міжнародним стандартам ISO/ASTM та впливу параметрів лазера на мікроструктуру й механічні властивості деталей. Систематизовано характеристики найпоширеніших матеріалів — титанових, алюмінієвих, нікелевих сплавів, нержавіючих сталей, кобальт-хромових і мідних систем.*

***Ключові слова:** лазерні 3D-технології, адитивне виробництво, металеві порошки, селективне лазерне плавлення, селективне лазерне спікання, пряме енергетичне осадження, металеві сплави.*

*Kalyuzhnyi O.B., Platkov V.Ya. Marchenko. M.M. **Laser Sintering Methods and Materials Science Aspects in Metal Additive Manufacturing: An Analytical Review***

***Abstract.** The article presents a review of modern laser 3D technologies for processing metallic materials, which represent a leading direction in additive manufacturing. The fundamental principles of laser-metal interaction, melting and solidification mechanisms, and the importance of in-situ monitoring for quality assurance are discussed. The main laser-based 3D printing methods (SLS, SLM, DMLS, DED/LENS) are summarized, outlining their advantages, limitations, and areas of application. Special attention is paid to the requirements for metallic powders, ISO/ASTM standards, and the influence of laser parameters on microstructure and mechanical properties. The characteristics of widely used materials — titanium, aluminum, nickel alloys, stainless steels, cobalt-chromium, and copper systems — are systematized.*

***Keywords:** laser 3D technologies, additive manufacturing, metal powders, selective laser melting, selective laser sintering, directed energy deposition, metallic alloys.*

1. Вступ

Лазерні 3D-технології металевих матеріалів – це група адитивних технологій (АТ), в яких джерелом енергії для плавлення чи спікання металевого порошку або дроту виступає лазерний промінь. Суть їх полягає у поетапному (шар за шаром) створенні тривимірних деталей без використання традиційних методів лиття чи механічної обробки. У сучасній промисловості лазерні 3D-технології металевих матеріалів відіграють ключову роль у формуванні виробничих процесів, пропонуючи виняткові можливості для створення складних, високопродуктивних компонентів. Адитивне виробництво (АВ), відоме як 3D-друк, стало однією з швидкозростаючих технологій у сучасному промисловому та науковому середовищі. Особливо значущим є розвиток металевого адитивного виробництва (МAM), яке перетворилося на повноцінний промисловий процес для виготовлення складних та індивідуалізованих металевих компонентів.

Інтерес до АВ не є випадковим, оскільки ця технологія пропонує рішення основних проблем, з якими стикається традиційне виробництво. Вона дозволяє долати обмеження, пов'язані з дизайном, мінімізувати матеріальні відходи та скорочувати терміни виконання замовлень [1]. Традиційні методи виробництва часто змушують йти на компроміси у дизайні, оскільки складна геометрія або інтеграція кількох функцій в одній деталі, як правило, неможливі або економічно недоцільні. Металеve АВ усуває ці обмеження, забезпечуючи високу гнучкість дизайну, що дозволяє створювати оптимізовані, легкі та складні структури, які раніше були недосяжні [2]. АВ не просто зміна способу виробництва, а фундаментальна зміна принципів проектування, що дозволяє зосередитися виключно на оптимізації функціональності без обмежень, накладених традиційними виробничими процесами.

Лазерні технології є центральним елементом цієї трансформації. Вони забезпечують високу швидкість, гнучкість та точність обробки металів, що є критично важливим для адитивного виробництва [3]. Лазерний промінь здатний миттєво передавати значну кількість енергії у центральну мікромасштабну область, що дозволяє досягати високої точності та працездатності при формуванні деталей [4].

Сучасний розвиток лазерних 3D-технологій металевих матеріалів характеризується кількома ключовими тенденціями, що спрямовані на підвищення ефективності, точності та розширення сфер застосування.

Однією з провідних тенденцій є розробка та впровадження високопотужних лазерів. Наприклад, волоконні лазери потужністю до 10 кВт суттєво розширили можливості лазерних технологій, дозволяючи не лише точне різання та зварювання, а й загартування металів та ефективний 3D-друк. Збільшення потужності забезпечує вищу швидкість обробки та дозволяє працювати зі сплавами з високими властивостями, такими як нікелеві, хромові, титанові [4, 5]. Це підвищує продуктивність і дозволяє обробляти більші об'єми матеріалів за менший час.

Значне якісне покращення відбувається завдяки інтеграції штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) у системи керування лазером. Це призвело до появи лазерів, які автоматично адаптуються до різних робочих умов. Вони на основі даних, отриманих від зовнішніх сенсорів, саморегулюють потужність променя, фокусування, швидкість обробки та інші параметри [6]. Ця інтеграція технологій дозволяє долати раніше непереборні обмеження, такі як термічні деформації або нерівномірний контроль мікроструктури, значно покращуючи ефективність процесу та якість кінцевого продукту. Перехід до динамічних, самооптимізуючих систем, керованих ШІ/МН, є критично важливим для подолання притаманних процесу нестабільностей та досягнення надійності та відтворюваності на промисловому рівні. Це дозволяє автоматично

коригувати параметри в реальному часі, мінімізуючи дефекти та оптимізуючи процес, що є критично важливим для складних металевих сплавів [7].

Іншим важливим напрямком є розвиток гібридних лазерних систем. Такі системи поєднують кілька типів лазерів в одному пристрої (наприклад, волоконні та CO₂ лазери) або АВ з традиційними методами обробки, такими як механічна обробка (фрезерування з ЧПК). Вони можуть виконувати два технологічні процеси одночасно в одному циклі, наприклад, зварювання та різання металів, що скорочує загальний час виробництва та знижує енергоспоживання [8]. Це вказує на перехід до інтегрованих рішень, які дозволяють поєднувати переваги різних методів, підвищуючи точність та якість поверхні.

Ще одним перспективним напрямком є розвиток ультрашвидких імпульсних лазерів. Їхня ключова перевага полягає у мінімальному термічному впливі на матеріал, що дозволяє ефективно працювати з чутливими матеріалами без пошкодження їхньої структури. Хоча це має особливе значення для біологічних тканин та полімерів, потенціал для металів полягає у зменшенні теплових деформацій та досягненні ще вищої точності [9].

Крім того, сучасні технології металообробки все більше спрямовані на сталий розвиток та зниження впливу на навколишнє середовище. Адитивне виробництво, за своєю природою, є більш ефективним у використанні ресурсів, оскільки додає матеріал лише там, де це необхідно. Зниження споживання енергії та можливість використання відновлюваних джерел енергії додатково підкреслюють екологічні переваги. Це не лише відповідає зростаючим екологічним вимогам, але й забезпечує економічну вигоду за рахунок зменшення витрат на матеріали та утилізацію [10].

2. Принципи лазерного 3D-друку металів

В основі лазерного 3D-друку металів лежить складна взаємодія високоенергетичного лазерного променя з металевим порошком, що призводить до його плавлення або спікання та подальшого затвердіння. Лазери є найефективнішим джерелом енергії в адитивному виробництві, оскільки їхні промені можуть миттєво передавати велику кількість енергії у мікромасштабну фокусну область [11]. Це відбувається завдяки просторовій когерентності лазерного світла, що дозволяє променям поширюватися без критичного розходження або втрати потужності на великі відстані та фокусуватися у надзвичайно малі плями [12].

Під час лазерного 3D друку промінь лазера ефективно поглинається матеріалом, що призводить до термічного спікання або повного плавлення металевого порошку [11]. Взаємодія лазера з металом у процесах, таких як селективне лазерне плавлення (SLM), є надзвичайно динамічною. Вона включає одночасну присутність металу у вигляді пари, рідини, порошку та твердого тіла [12].

Існує критичний баланс між достатньою енергією для повного плавлення/спікання та надмірною енергією. Якщо потужність лазера занадто висока, розплавлений метал може інтенсивно випаровуватися, утворюючи комбінацію тиску віддачі пари та плазми. Це може призвести до формування локальної депресії з підвищеним поглинанням лазера, відомої як "keyhole" (ключова діра), що є нестабільним і може спричинити утворення пористості в кінцевій деталі [13]. Перехід до режиму "keyhole", спричинений підвищенням щільності лазерної енергії, є вирішальним фактором якості деталі, безпосередньо впливаючи на пористість та цілісність матеріалу [13]. Цей перехід являє собою поріг, за яким контроль процесу стає значно складнішим. Точне калібрування параметрів лазера (потужність, швидкість сканування, діаметр плями) є надзвичайно важливим для кожного конкретного матеріалу та геометрії, щоб уникнути дефектів.

Під час друку розплавлений матеріал затвердіває набагато швидше за наявності високого температурного градієнта. Це швидке затвердіння та охолодження в адитивному виробництві забезпечують отримання унікальної ультрадрібнозернистої мікроструктури з пересиченими атомами твердого розчину [14]. На відміну від традиційно литих або кованих деталей, швидкі термічні цикли під час 3D-друку можуть індукувати in-situ осадження, що є формою внутрішньої термічної обробки. Ця особливість процесу дозволяє не просто виготовляти деталі, але і впливати на їхні фундаментальні властивості. Наприклад, дослідження показали, що контролюючи склад сплавів, таких як марганець та залізо, можна змінювати мікроструктуру, руйнуючи стовпчасті структури та зменшуючи розмір зерен, що покращує межу текучості кінцевого металу. Це відкриває шлях до створення матеріалів з властивостями, спеціально оптимізованими для конкретних застосувань [15].

Динамічний характер взаємодії лазера з металом робить моніторинг процесу in-situ критично важливим для підвищення надійності та якості адитивного виробництва. Наприклад, висока температура в області розплаву (>2000 K) призводить до термоелектронної емісії, яку можна використовувати для моніторингу процесу. Здатність моніторити термоелектронну емісію як індикатор температури та морфології поверхні в реальному часі дозволяє виявляти та коригувати дефекти [17]. Це має важливе значення для переходу від дослідницьких установок до надійного промислового виробництва, оскільки дозволяє операторам або автоматизованим системам виявляти аномалії в реальному часі та вносити корективи в параметри лазера, мінімізуючи кількість браку та покращуючи відтворюваність процесу. Перехід від кінцевого контролю, після виготовлення деталі, до моніторингу in-situ та корекції дефектів у реальному часі є фундаментальною зміною у забезпеченні якості для АВ, що наближає до виробництва "з першого разу" без дефектів.

3. Методи лазерного 3D-друку металів

Лазерний 3D-друк металів охоплює кілька ключових технологій, кожна з яких має свої унікальні принципи роботи, переваги та сфери застосування.¹ Найбільш поширеними є методи, засновані на технології порошкового шару (Powder Bed Fusion – PBF), такі як SLS, SLM та DMLS, а також технології прямого енергетичного осадження (Directed Energy Deposition – DED), зокрема лазерна інженерія кінцевої форми (LENS).

3.1. Селективне лазерне спікання

Селективне лазерне спікання (SLS) є методом адитивного виробництва, що використовує високопотужний лазер для спікання тонких шарів порошкових матеріалів у тверді, функціональні деталі. Цей процес зазвичай застосовується для створення міцних пластикових деталей, використовуючи поліаміди (нейлони), алюмід (суміш алюмінієвого порошку та поліаміду) та гумоподібні порошки. Товщина шарів порошку, що спікається, зазвичай становить від 20 до 100 мкм.

Однією з ключових переваг SLS є відсутність потреби в опорних структурах. Неспечений порошок, що оточує деталь, природно підтримує модель під час її побудови, що значно спрощує дизайн та постобробку. Ця особливість є не лише технічною перевагою, а й значною економічною та часовою вигодою, оскільки вона зменшує час постобробки, витрати матеріалу та дозволяє "вкладати" кілька деталей в одну збірку для максимального використання об'єму камери, що підвищує продуктивність. SLS-принтери часто оснащуються великими камерами побудови (до 750 мм), що дозволяє виготовляти як великі вироби, так і цілі партії невеликих об'єктів за один цикл. Технологія відносно недорога для прототипування та підходить для візуальних моделей. Крім того, неспечений порошок може бути використаний повторно для наступних виробничих циклів, що робить SLS технологією з нульовими відходами.¹ Це має важливі

наслідки для сталого розвитку, оскільки значно знижує матеріальні відходи порівняно з традиційними методами або іншими АВ-технологіями, де нерозплавлений порошок може бути забруднений. SLS ідеально підходить для швидкого прототипування, малосерійного виробництва та виготовлення кінцевих компонентів з промисловою точністю. Він забезпечує високу міцність, деталізацію та свободу дизайну, конкуруючи з литтям під тиском без високих витрат на оснастку. Незважаючи на ці переваги, SLS має певні обмеження, такі як відносно повільна швидкість для металів та залежність якості поверхні від розміру зерна порошку [18].

Хоча SLS частіше асоціюється з полімерами, існують модифікації, які можуть працювати з металевими порошками та сплавами.

3.2. Селективне лазерне плавлення

Селективне лазерне плавлення (SLM) має той самий технічний принцип, що й SLS, але відрізняється тим, що використовується виключно для металевих матеріалів і передбачає повне розплавлення порошку, а не лише спікання. Цей процес відбувається в робочій камері, яка заповнюється інертними газами, такими як аргон, для запобігання окисненню металу під час плавлення [19].

Процес SLM починається зі створення точної 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення CAD, яка потім розбивається на тисячі тонких шарів. На кожному етапі тонкий шар металевого порошку рівномірно розподіляється по платформі побудови. Потужний лазерний промінь, керований системою сканування (дзеркалами та лінзами), методично плавить металевий порошок у точках, визначених цифровою моделлю, відповідно до контуру поточного шару. Після завершення кожного шару платформа опускається на одну висоту шару, і новий шар порошку розподіляється за допомогою скребоків або роликів. Платформа побудови постійно нагрівається протягом усього процесу для підтримки оптимальної температури та зменшення термічних напружень [20].

Повне плавлення порошку в SLM забезпечує високу щільність кінцевих деталей (до 99.9%), що призводить до відмінних механічних властивостей, порівнянних з традиційно виготовленими кованими матеріалами. Це робить SLM ідеальним для критично важливих застосувань, де міцність та структурна цілісність є першочерговими. Однак, висока щільність та повне плавлення мають свої недоліки. SLM вимагає використання опорних структур для нависаючих елементів та складних геометрій. Це необхідно для запобігання деформації через високі залишкові напруги, що виникають під час швидкого охолодження металу, та для підтримки геометрії деталі. Мінімальна товщина стінки, яку можна досягти за допомогою SLM, зазвичай становить 0.5-1.0 мм. Після друку деталі проходять обов'язкову постобробку, що включає видалення опорних структур, термічну обробку для зняття залишкових напруг та покращення мікроструктури, а також полірування для досягнення необхідної якості поверхні.

Переваги SLM включають можливість створення деталей зі складною геометрією та внутрішніми елементами, скорочення часу виконання замовлень (оскільки не потрібна оснастка), а також можливість одночасного виробництва кількох деталей. Незважаючи на високу вартість обладнання та спеціальних металевих порошоків, SLM є основною технологією для виробництва високопродуктивних компонентів у таких галузях, як аерокосмічна, медична та автомобільна.

3.3. Пряме лазерне спікання металів

Пряме лазерне спікання металів (DMLS) є ще однією поширеною технологією адитивного виробництва, що використовує лазер для створення металевих деталей. Хоча терміни DMLS та SLM часто використовуються взаємозамінно, існують важливі відмінності в їхніх фундаментальних процесах. DMLS є різновидом SLS, адаптованим для металевих порошоків.¹ На відміну від SLM, який передбачає повне плавлення

порошку, DMLS нагріває металевий порошок майже до температури плавлення, викликаючи спікання та синтез частинок через хімічну реакцію. Це часткове спікання означає, що деталі, виготовлені за технологією DMLS, можуть мати менші залишкові напруги порівняно з технологією SLM, оскільки матеріал не проходить повну фазу плавлення та кристалізації. Проте, це також може призвести до підвищення пористості (5-8%) та варіацій механічних властивостей через неповне злиття частинок. Після друку деталі зазвичай піддаються термічній обробці для зняття будь-яких залишкових напруг та покращення механічних властивостей [21].

У процесі DMLS використовують оптоволоконні лазери, зазвичай потужністю близько 200 Вт. Для підвищення продуктивності може бути використано кілька лазерів. Технологія дозволяє друкувати точні деталі з високою роздільною здатністю та складною геометрією. Отримані деталі характеризуються відмінною якістю поверхні та механічними властивостями, близькими до кованих металів. DMLS пропонує широку доступність матеріалів, включаючи нержавіючу сталь, алюмінієві, нікелеві сплави, титан, мідь та вольфрам. Він також підтримує композитні матеріали та гібридний друк метал-кераміка. Це робить DMLS гнучким до виготовлення унікальних форм та дизайнів зі стабільними механічними властивостями. Технологія дозволяє зменшити витрати на інструментальне оснащення, забезпечує гнучкість дизайну та дозволяє цифрово архівувати деталі для друку "на вимогу".

Незважаючи на переваги, DMLS має свої недоліки. Обладнання є дорогим у придбанні та експлуатації, вимагає кваліфікованих операторів та подальшої постобробки. Крім того, швидкість друку може бути відносно повільною, а об'єми побудови зазвичай малі. Вибір між DMLS та SLM залежить від пріоритетів: якщо критична висока щільність та механічні властивості, то SLM є кращим; якщо важлива гнучкість матеріалів та менші напруги, то DMLS може бути оптимальним. Ця відмінність між DMLS та SLM (спікання проти повного плавлення) має значні наслідки для властивостей матеріалу, зокрема щільності та залишкових напруг, що, своєю чергою, визначає їх придатність для критичних застосувань [22].

3.4. Пряме енергетичне осадження (DED), зокрема LENS

Пряме енергетичне осадження (DED) є ще однією важливою технологією адитивного виробництва металів, що суттєво відрізняється від методів порошкового шару (PBF). У DED металевий порошок або дріт подається безпосередньо в розплавлену ванну, яка створюється сфокусованим джерелом теплової енергії, таким як лазер, плазмова дуга або електронний промінь. Це дозволяє створювати деталі шляхом наплавлення зварних валиків [23, 24].

LENS (Laser Engineered Net Shaping) є однією з найвідоміших технологій DED, яка використовує високопотужний лазер (від 400 Вт до 3 кВт) для плавлення порошкових металів у повністю щільні тривимірні структури. Процес LENS, як і інші методи АВ, керується геометричною інформацією з CAD-моделі, що дозволяє будувати компонент шар за шаром. Для забезпечення геометричної та механічної цілісності готової деталі використовуються додаткове програмне забезпечення та системи контролю із замкненим циклом. Важливою особливістю процесу LENS є його проведення в герметично закритій камері, яка продувається аргоном. Це дозволяє підтримувати рівень кисню та вологи нижче 10 ppm, що є критично важливим для запобігання окислення металу та збереження якості деталі. Система подачі порошку точно регулює масовий потік матеріалу до зони плавлення. Після завершення друку компоненти можуть бути піддані різним видам постобробки, включаючи термічну обробку, гаряче ізостатичне пресування (HIP), механічну обробку або інші фінішні операції. LENS підтримує обробку багатьох високопродуктивних металів, таких як титан, нержавіюча сталь та Inconel, забезпечуючи якість, необхідну для критично важливих застосувань [25].

На відміну від PBF, DED (LENS) не обмежується об'ємом порошкового шару, що робить його ідеальним для ремонту існуючих компонентів та виготовлення великогабаритних деталей (наприклад, відновлення зношених залізничних коліс), DED також дозволяє створювати нові матеріали з декількох металів або додавати функціональні елементи до вже існуючих деталей. Для певних деталей DED може бути до 10 разів швидшим та у 5 разів дешевшим, ніж PBF [23].

Однією з ключових тенденцій є можливість інтеграції LENS як модульного друкованого елемента в існуючі або нові верстати з ЧПК. Це є важливим кроком до гібридного виробництва, що поєднує переваги адитивного та субтрактивного методів. Деталі, які виготовлені за допомогою DED, часто мають шорстку поверхню, яка потребує подальшої механічної обробки. Інтеграція DED-систем безпосередньо у верстати з ЧПК дозволяє виконувати адитивне наплавлення та субтрактивну обробку в одному циклі без необхідності переміщення деталі. Це значно скорочує час виробництва, підвищує точність та дозволяє створювати деталі зі складною внутрішньою геометрією та високоякісною зовнішньою поверхнею [26, 27].

4. Обладнання та типи лазерів для 3D-друку металів

Для реалізації лазерного 3D-друку металів використовується спеціалізоване обладнання, що поєднує високоточні механічні системи, потужні лазерні джерела та складне програмне забезпечення. Сучасні 3D-принтери по металу, такі як FastForm FF-M180D, спроектовані для постійного друку точних деталей, наприклад, у стоматології. Ці машини оснащені потужними лазерами, які забезпечують високу ефективність та швидкість друку, зберігаючи при цьому високу якість виробів [28].

Важливим компонентом є гальванометричні сканери (наприклад, Scanlab), що характеризуються високою точністю, точним контролем положення та мінімальним дрейфом лазерного променя. Системи SLM, такі як Renishaw AM400, використовують ітербієві волоконні лазери. Деякі конфігурації можуть мати два лазери для збільшення потужності (з 200 Вт до 400 Вт) при збереженні розміру плями 70 мкм. Оптика включає 2D скануючу систему та гальванометричний сканер з вбудованим позиціонуванням по осі Z. Сканер складається з двох сервомоторів/гальванометрів з рухомим ротором та індуктивним датчиком положення ротора [29].

Параметри лазера, такі як потужність, швидкість сканування та діаметр сфокусованої плями, безпосередньо впливають на якість друку. Ці параметри є ключовими для контролю мікроструктури, щільності та точності кінцевого виробу. Потужність лазера визначає глибину плавлення та швидкість процесу: занадто низька потужність може призвести до неповного спікання/плавлення, а занадто висока – до випаровування та дефектів. Діаметр плями впливає на роздільну здатність та деталізацію. Швидкість сканування контролює час взаємодії лазера з матеріалом, що впливає на термічні напружки та мікроструктуру. [30, 31].

Оптимальне налаштування цих параметрів є складним завданням, що вимагає глибокого розуміння взаємодії лазера з матеріалом. Взаємодія між параметрами лазера та відгуком матеріалу є нелінійною та надзвичайно складною, що виключає універсальні "оптимальні" налаштування. Це вимагає розробки матеріало- та геометрійно-специфічних карт процесів та адаптивного контролю. Складність виникає через те, що зміна одного параметра впливає на численні фізичні явища (розмір розплавленої ванни, температурні градієнти, швидкість випаровування, швидкість затвердіння), які, своєю чергою, впливають на кінцеву мікроструктуру та механічні властивості. Таким чином, єдиного набору "найкращих" параметрів не існує для всіх матеріалів або геометрій деталей. Замість цього потрібна "карта процесу", яка визначає оптимальні діапазони параметрів для конкретних сплавів та бажаних властивостей [32].

Характеристики лазерних систем, що використовуються, зазвичай лежать в таких межах: потужність лазера 50-500 Вт, швидкість сканування до 2 м/с, швидкість позиціонування до 7 м/с, діаметр сфокусованої плями 35-400 мкм.

Серед типів лазерів, що використовуються в промисловості, найпоширенішими є волоконні та газові CO₂ лазери. Волоконні лазери є меншими за розміром, мають майже подвоєну потужність та більшу продуктивність при аналогічному споживанні струму порівняно з CO₂ лазерами. Вони також здатні ефективно обробляти кольорові метали, такі як мідь і латунь, і є значно дешевшими в обслуговуванні. Тому перехід до волоконних лазерів є важливою тенденцією, що зумовлена їхньою компактністю, вищою ефективністю та нижчими експлуатаційними витратами. Для систем DED/LENS використовуються більш потужні лазери, діапазон потужностей яких становить від 400 Вт до 3 кВт [33].

Крім апаратного забезпечення, сучасні 3D-принтери по металу нерозривно пов'язані з програмним забезпеченням. Прогресивне програмне забезпечення (наприклад, Fastlayer) адаптоване для високоточного промислового друку, дозволяючи ідеально розміщувати деталі на платформі, проводити коригування різної складності та інтегрувати бази даних параметрів друку для різних металевих матеріалів. Це свідчить, що якість 3D-друку металів є результатом комплексної взаємодії апаратного, програмного забезпечення та інтелектуальних систем. Навіть найпотужніший лазер та найточніша оптика не будуть ефективними без інтелектуального керування. Системи зворотного зв'язку та ШІ дозволяють автоматично коригувати процес у реальному часі, що є критично важливим для мінімізації браку та підвищення відтворюваності [34, 35].

5. Загальні властивості та вимоги до металевих порошків 3D-друка

Металеві порошки є основною сировиною для лазерного 3D-друку металів, особливо для технологій порошкового шару (PBF). Якість кінцевого продукту безпосередньо залежить від характеристик цих порошків. Для забезпечення високої якості та стабільності процесу друку, металеві порошки повинні відповідати низці суворих вимог до своїх властивостей [36].

Оптимізація характеристик порошку (сферичність, розподіл частинок за розміром, текучість) є складною проблемою, де покращення однієї властивості може негативно вплинути на іншу, що вимагає комплексного підходу до його вибору [37].

Чистота порошку є суттєво важливою. Керамічні вclusions, які мають високу температуру плавлення і важко спікаються, значно знижують якість кінцевої деталі. Тому їхня відсутність у порошку є обов'язковою. Крім того, суворо контролюється вміст кисню та азоту [38]. Технологія приготування порошку для металевого 3D-друку, в основному, базується на методі атомізації, що призводить до того, що порошок має велику питому поверхню і легко окислюється. Висока питома поверхня та реакційна здатність атомізованих металевих порошків, хоча й необхідні для процесів АВ, створюють суттєву вразливість до забруднення (особливо киснем), що безпосередньо впливає на механічні властивості та утворення дефектів у кінцевій деталі. Низька чистота може призвести до зростання кількості дефектів у мікроструктурі та погіршенню механічних властивостей. Це означає, що поводження з порошком та його зберігання є настільки ж важливими, як і сам процес друку.

Плинність порошку безпосередньо впливає на рівномірність його розтікання під час друку та стабільність процесу подачі порошку. Вона залежить від морфології порошку, розподілу частинок за розміром та насипної щільності. Чим менша частка дрібного порошку, тим краща його плинність. Якщо щільність частинок залишається незмінною, відносна густина збільшується, а плинність порошку зростає. Адсорбція води, газу тощо на поверхні частинок зменшує плинність порошку. Низька плинність

може спричинити нерівномірне розподілення шарів, що призведе до порожнин або нерівномірного плавлення [39].

Різне обладнання для 3D-друку та процеси формування обумовлюють різні вимоги до розподілу частинок за розміром. Зазвичай застосовувані діапазони розмірів частинок для металевих 3D-друку становлять 15-53 мкм (дрібний порошок) та 53-105 мкм (грубий порошок). Дрібні порошки підходять для принтерів, що використовують лазер як джерело енергії (наприклад, SLM/DMLS), через їх тонку фокусну пляму та легке плавлення цього порошку. Спосіб подачі порошку – пошарове порошкове покриття. Для принтерів з коаксіальним способом подачі порошку (наприклад, DED), які мають дещо більшу пляму фокусування, можна використовувати грубий порошок. Неправильний розподіл частинок за розміром впливає на стабільність розплавленої ванни та щільність кінцевої деталі [40].

Морфологія (сферичність) порошку тісно пов'язана зі способом його приготування. Чим вища сферичність частинок порошку, тим краща його плинність. Металевий порошок для 3D-друку вимагає сферичності понад 98%, щоб розсіпання та подача порошку були легшими під час друку. Якість порошку сильно впливає на якість деталі, зокрема на її щільність та пористість. Дослідження показують, що занадто грубий або занадто дрібний порошок, або низька округлість частинок перешкоджають досягненню високої щільності [41].

Таким чином, контроль якості порошку є важливим етапом забезпечення якості 3D-друкованих металевих деталей. Висока ефективність використання матеріалів та можливість повторного використання неспеченого порошку роблять металевий 3D-друк економічно та екологічно доцільним, знижуючи витрати на сировину та мінімізуючи відходи.

В лазерному металевому АВ важливу роль грає стандартизація порошків. Існує ряд стандартів які є критично важливими для забезпечення відтворюваності, надійності та якості металевих порошків, що, у свою чергу, сприяє ширшому промислового впровадженню адитивного виробництва [42]. ISO/ASTM 52907:2019 містить технічні специфікації для металевих порошків, включаючи документування, відбір проб, гранулометричний склад, хімічний склад, густину, морфологію, сипучість, забруднення, пакування та зберігання. ISO/ASTM 52909:2022 охоплює оцінку механічних властивостей готової частини, включаючи статичні/квазістатичні та динамічні випробування. Постійний розвиток міжнародних стандартів як для металевих порошків, так і для готових деталей, виготовлених за допомогою АВ, є важливим фактором для широкого промислового впровадження АВ. Це перетворює технологію зі спеціалізованого, часто кустарного процесу на надійний, відтворюваний та сертифікований метод виробництва.

6. Металеві матеріали, що застосовуються у лазерному 3D-друці

Лазерний 3D-друк дозволяє працювати з широким спектром металевих сплавів, кожен з яких має свої унікальні властивості та оптимальні сфери застосування.

6.1. Титанові сплави

Титанові сплави є одними з найбільш широко використовуваних матеріалів у 3D-друці завдяки їхнім винятковим властивостям. Вони міцні, як сталь, але вдвічі легші, що робить їх ідеальними для застосувань, де критично важливе співвідношення міцності до ваги. Крім того, титанові сплави демонструють високу термічну міцність, відмінну стійкість до корозії та низьких температур, а також є біосумісними. Найпоширенішим сплавом є Ti6Al4V, що складається з 88-90% титану, 5.5-6.75% алюмінію та 3.5-4.5% ванадію [43].

Завдяки цим властивостям, титанові сплави знаходять широке застосування в:

– Авіації та космосі: Для виготовлення легких та високоміцних компонентів, таких як конструктивні елементи планера, лопатки компресора, ротори, кільця для реактивних двигунів та космічних капсул. 3D-друковані титанові сплави мають чудові комплексні механічні властивості, що відповідають вимогам авіаційних двигунів, а їхні механічні властивості (міцність на розрив, межа текучості та подовження) вищі ніж у поковок.

– Медицині та стоматології: Титан є гіпоалергенним та біосумісним металом, що робить його ідеальним для хірургічних інструментів, медичних імплантатів (хребта, стегон, колін), індивідуальних протезів та стоматологічних конструкцій. Можливість 3D-друку дозволяє створювати індивідуальні та складні імплантати з пористими структурами, які сприяють вrostанню кістки, покращуючи інтеграцію імплантату та результати лікування.

– Автоспорті: Для гальмівних супортів, кронштейнів, колісних дисків.

– Ювелірній промисловості: Для виготовлення гіпоалергенних прикрас.

Лазерний 3D-друк дозволяє створювати з титану непрямокутні об'єкти органічної форми та сітчасті структури, які неможливо виготовити жодним іншим процесом. Типові специфікації для друку титаном включають мінімальну товщину стінки 1 мм, мінімальні деталі 0.25 мм та точність $\pm 0.2\%$.

6.2. Алюмінієві сплави

Алюмінієві сплави є легкими та високоміцними матеріалами, що демонструють величезний потенціал у 3D-друці. Вони мають гарну хімічну стійкість, одну з кращих питому міцність, стійкість до високих температур, а також відмінну тепло- та електропровідність.

Поширені алюмінієві сплави для 3D-друку включають: AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6, AlSi12,

Сплав AlSi10Mg є одним із найбільш поширених матеріалів для SLM. Його склад ідеально підходить для цього процесу завдяки вмісту кремнію, який забезпечує хорошу плинність розплаву, та магнію, який дозволяє досягти значного зміцнення матеріалу після термічної обробки. Це надає сплаву високу міцність і твердість при відносно малій вазі, що робить його незамінним у виробництві легких, але міцних компонентів для аерокосмічної та автомобільної галузей [44].

Сплав AlSi7Mg0.6 поєднує менший вміст кремнію з більшою кількістю магнію, що надає йому оптимальний баланс міцності та пластичності. Це робить його придатним для деталей, які повинні витримувати значні динамічні навантаження або потребують високої пластичності, наприклад, у деталях авіаційних конструкцій або компонентах шасі автомобілів. Після термічної обробки сплав AlSi7Mg0.6 демонструє високі механічні властивості.

Сплав AlSi12, завдяки вмісту кремнію, близькому до ефективного складу (12.6%), має найнижчу температуру плавлення та виняткову плинність. Ця характеристика є важливою, оскільки дозволяє виробляти деталі з дуже тонкою стінкою та складною геометрією. На відміну від AlSi10Mg і AlSi7Mg0.6, AlSi12 не може бути значно зміцнений термічною обробкою.

Застосування алюмінієвих сплавів у 3D-друці охоплює такі галузі:

– Авіацію та космос: Для створення легких та високоміцних компонентів, таких як деталі авіаційних двигунів, фіюзеляж та секції крил, що дозволяє зменшити загальну вагу літака та підвищити ефективність використання палива.

– Автомобільну промисловість: Компоненти з алюмінієвих сплавів сприяють зменшенню ваги транспортних засобів, що призводить до покращення паливної ефективності та загальної продуктивності. Приклади включають конструкції кузова, компоненти двигуна та системи підвіски.

– Медичні пристрої: Для 3D-друку індивідуальних протезів та ортопедичних імплантатів.

Лазерний 3D-друк дозволяє створювати з алюмінію деталі з внутрішніми каналами та функціями, які неможливо виготовити іншим способом. Це є ключовим для розвитку легкої промисловості, де зниження ваги без втрати міцності є критично важливим. Крім того, 3D-друк алюмінієм часто вимагає нижчих виробничих витрат та менше енергії порівняно з литтям або механічною обробкою, що є значною економічною перевагою.

6.3. Сплав Scalmalloy

Scalmalloy – один із найперспективніших сплавів, створених спеціально для SLM технологій. Основу матеріалу становить алюміній з легуванням магнієм (4,2–5,1 %), скандієм (0,6–0,9 %) та цирконієм (0,2–0,5 %), що забезпечує унікальне поєднання високої міцності, пластичності й термостабільності. Скандій утворює дрібнодисперсні зміцнювальні фази Al_3Sc , які значно підвищують межу текучості й запобігають рекристалізації, а цирконій стабілізує ці фази, зберігаючи дрібнозернисту структуру навіть при підвищених температурах. Сплав має тимчасовий опір розриву понад 500 МПа, межу текучості близько 480–500 МПа, відносне подовження 10–15 % та густину приблизно 2,67 г/см³, що робить його одним із найлегших та найміцніших алюмінієвих матеріалів. На відміну від традиційних алюмінієвих сплавів, Scalmalloy по питомій міцності наближається до титанових сплавів, але при цьому значно легший. Для адитивного виробництва цей сплав особливо зручний завдяки високій стійкості порошку до повторного використання, відсутності гарячих тріщин, здатності формувати тонкостінні та решітчасті конструкції складної геометрії, а також сумісності зі стандартними процесами зварювання. Його застосування охоплює авіаційну та космічну техніку, автоспорт, робототехніку та інші галузі, де критично важливим є поєднання міцності та мінімальної маси виробів [45].

6.4. Нікелеві сплави

Нікель та його сплави, зокрема Inconel, є незамінними матеріалами для виготовлення деталей, які повинні витримувати екстремальні умови – високі температури та агресивні хімічні середовища. Сплав Inconel 718, наприклад, демонструє відмінну тривалу міцність при температурах до 700 °C і є важливим матеріалом для більшості компонентів авіаційних двигунів з робочою температурою нижче 650 °C. Здатність 3D-друку виробляти деталі з точністю до мікронів є важливою для забезпечення їх довговічності та ефективності в умовах високого тиску. Ці матеріали особливо популярні в хімічній промисловості, енергетиці та авіації.

Застосування нікелевих сплавів у 3D-друці є критично важливим для галузей, що працюють в екстремальних умовах, таких як турбінні лопатки або компоненти ядерних реакторів. Адитивне виробництво дозволяє створювати складні геометрії, оптимізовані для цих умов, що неможливо традиційними методами. Крім того, дослідження механічних властивостей та структури сплаву Inconel 718, отриманого методом 3D-друку, показують можливість скорочення кількості необхідних операцій для виготовлення деталей. Це вказує на потенціал значного підвищення ефективності виробництва та зниження витрат у високотехнологічних галузях [46, 47].

6.5. Нержавіючі сталі

Нержавіючі сталі (AISI 304L, AISI 316L, AISI 321) є відносно дешевими та економічними металевими матеріалами для 3D-друку, що володіють значними корозійними властивостями та високою міцністю [48]. Вони дозволяють швидко та ефективно виготовляти невеликі партії складних промислових деталей. AISI 316L є одним з найбільш використовуваних видів аустенітної нержавіючої сталі з низьким вмістом вуглецю, що запобігає утворенню карбідів та надає вищу стійкість до корозії.

Ця сталь широко використовується для морського застосування, в сольових середовищах та в харчовій промисловості [49].

Ключові властивості нержавіючої сталі 316L для 3D-друку включають високу міцність, стійкість до корозії, високу твердість та зносостійкість.¹ Типові технічні характеристики порошку 316L: розмір частинок 10–45 мкм, сферична форма, щільність >99.5%, міцність 510 ± 50 МПа, міцність на розрив 620 ± 60 МПа, подовження $40 \pm 15\%$, модуль Юнга 220 ± 50 ГПа, твердість 18 ± 3 HRC, середня шорсткість Ra 18 ± 5 мкм.

Застосування нержавіючої сталі 316L охоплює:

- Деталі двигунів, машин та механізмів.
- Деталі літаків та космічних апаратів.
- Компоненти для автомобілів та мотоспорту.
- Приладобудування та пристрої контролю.
- Прес-форми для лиття пластмас.
- Дизайнерські елементи.

Нержавіючі сталі пропонують відмінний баланс між вартістю, механічними властивостями та корозійною стійкістю, робить їх універсальним вибором для широкого спектра промислових застосувань, де не потрібні екстремальні характеристики титану чи Inconel. Здатність швидко та ефективно виготовляти невеликі партії складних промислових деталей з нержавіючої сталі робить її ідеальною для масової кастомізації та виробництва "на вимогу", що є ключовою тенденцією в сучасному виробництві [50].

6.6. Інші матеріали

Крім основних, у лазерному 3D-друці металів також застосовуються інші важливі матеріали, що розширюють функціональні можливості технології:

– Кобальт-хромові сплави: Ці сплави широко використовуються в стоматології (для зубів, каркасів) та медичних імплантатах (індивідуальні протези). Вони характеризуються високою твердістю, міцністю, відмінною біосумісністю та корозійною стійкістю [51].

– Мідні сплави: Відзначаються відмінною тепло- та електропровідністю, а також високою жорсткістю. Їх застосування включає мікротеплообмінники, електротехніку та інструментальні вставки, де висока провідність є критично важливою [52, 53].

– Інструментальні сталі (наприклад, мартенситна сталь, H13): Ці сплави мають високу міцність, твердість та пластичність (яку можна додатково підвищити термічною обробкою). Вони стійкі до деформації та здатні зберігати ріжучу кромку при високих температурах. Застосовуються для виготовлення інструментів (стрижнів та вставок для лиття під тиском), функціональних прототипів та прес-форм [54, 55].

– Алюміди (інтерметалічні сполуки, які утворюються між алюмінієм та іншим металом або напівметалом): Відзначаються високою міцністю і жорсткістю при температурах до 1000 0C, низькою густиною, високою стійкістю до окислення та корозії, високою температурою плавлення, що дозволяє використовувати їх в екстремальних умовах [56].

Також для специфічних застосувань використовуються такі матеріали, як вольфрам, тантал та титан-танталовий сплав. Розширення палітри металевих сплавів, придатних для друку, зумовлене потребою до високоспецифічних, екстремальних вимог.

Наявність широкого спектра металевих матеріалів для 3D-друку дозволяє не тільки замінювати традиційно виготовлені деталі, але й створювати нові продукти з унікальними функціональними властивостями. Гнучність в виборі матеріалів є важлива перевага лазерного 3D-друку металів, що розширює сферу застосування та створення продуктів з оптимізованими характеристиками для конкретних потреб.

7. Висновки

Лазерні 3D-технології є основою трансформації сучасного виробництва. Ці технології забезпечують високу швидкість, точність та гнучкість створення складних, високопродуктивних компонентів. На відміну від традиційних методів, вони усувають обмеження, пов'язані з дизайном, мінімізують матеріальні відходи та скорочують терміни виконання замовлень.

Сучасний розвиток галузі лазерних 3D-технологій характеризується такими основними тенденціями:

– Впровадження високопотужних лазерів (до 10 кВт), які підвищують швидкість обробки та розширюють спектр матеріалів, що обробляються, включаючи нікелеві, хромові та титанові сплави.

– Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) для створення самооптимізуючих систем, що автоматично коригують параметри процесів 3D-друку в реальному часі, мінімізуючи дефекти та підвищуючи якість обробки кінцевих компонентів.

– Розвиток гібридних систем, що поєднують АВ з традиційною механічною обробкою, дозволяючи виконувати кілька процесів одночасно.

Існує декілька основних технологій лазерного 3D-друку металів, кожна з яких має унікальні характеристики:

– Селективне лазерне плавлення (SLM) забезпечує високу щільність деталей (до 99,9%) та відмінні механічні властивості, що робить його ідеальним для особливо важливих застосувань.

– Пряме лазерне спікання металів (DMLS), хоч і надає виробам меншу щільність та вищу пористість порівняно з SLM, більш гнучке щодо матеріалів та дозволяє отримати деталі з меншими залишковими напруженнями.

– Пряме енергетичне осадження (DED), зокрема лазерна інженерія кінцевої форми (LENS), оптимальне для ремонту та виготовлення великогабаритних деталей, оскільки не обмежене об'ємом порошкового шару. Ця технологія також може бути в 10 разів швидшою та в 5 разів дешевшою за PBF для певних завдань.

Якість кінцевого продукту суттєво залежить від характеристик металевих порошків (чистота, сферичність, текучість) та ретельного калібрування параметрів лазера (потужність, швидкість сканування, діаметр плями). Взаємодія цих параметрів є складною і нелінійною, що вимагає використання ШІ, МН та розробки спеціальних "карт процесів" для досягнення оптимальних результатів.

Лазерні 3D-технології не лише інноваційні, а й екологічно вигідні, оскільки вони сприяють більш ефективному використанню ресурсів та зниженню матеріальних відходів, що відповідає концепції сталого розвитку. Подальша інтеграція технологій ШІ та гібридних систем обіцяє значно підвищити надійність, точність та економічну ефективність цього виробництва.

Лазерні 3D-технології металевих матеріалів не просто інструмент, а стратегічний напрямок, що визначає майбутнє виробництва. Їхній потенціал у створенні високопродуктивних, індивідуалізованих та екологічно чистих продуктів робить їх ключовим елементом четвертої промислової революції.

Список використаних джерел

1. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., Bernat, J. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review // Sensors. 2024. Vol. 24, Issue 9. Article Number 2668. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092668>.

2. Peyre, P. The Physics of Metal Additive Manufacturing Processes // Additive Manufacturing of Metal Alloys 1. 2022. P. 151–199. DOI: 10.1002/9781394163380.ch3
3. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Gu, Y. F. Review of selective laser melting: Materials and applications // Applied Physics Reviews. 2015. Vol. 2, Issue 4. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.
4. Gao, B., Zhao, H., Peng, L., Sun, Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM) // Micromachines. 2023. Vol. 14. Article Number 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14010057>.
5. Mangano, F., Chambrone, L., van Noort, R., Miller, C., Hatton, P., Mangano, C. Direct Metal Laser Sintering Titanium Dental Implants: A Review of the Current Literature // International Journal of Biomaterials. 2014. Vol. 2014. Article ID 461534. DOI: 10.1155/2014/461534.
6. Ladani, L. J. Applications of artificial intelligence and machine learning in metal additive manufacturing // Journal of Physics: Materials. 2021. Vol. 4, Issue 4. Article Number 042009. DOI: [10.1088/2515-7639/ac2791](https://doi.org/10.1088/2515-7639/ac2791)
7. Ukwaththa, J.; Herath, S.; Meddage, D.P.P. A review of machine learning (ML) and explainable artificial intelligence (XAI) methods in additive manufacturing (3D printing). Mater. Today Commun. 2024, 41, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110294>
8. Sahu, A.K.; Malhotra, J.; Jha, S. Laser-Based Hybrid Micromachining Processes: A Review. Opt. Laser Technol. 2022, 146, 107554. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107554>
9. Lizunov S. A., Bulgakov A. V., Zhidkov I. S., Kirichenko N. A., Lyalin A. G., Rethfeld B. Melting of gold by ultrashort laser pulses: advanced two-temperature modeling and comparison with surface damage experiments // Applied Physics A. – 2022. – Vol. 128. – Article number: 602. – DOI: 10.1007/s00339-022-05733-4.
10. Khalid M., Peng Q. Sustainability and Environmental Impact of Additive Manufacturing: A Literature Review // Computer-Aided Design and Applications, 2021, Vol. 18(6), pp. 1210–1232. – DOI: 10.14733/cadaps.2021.1210-1232
11. Humnabad, P. S., Tarun, R., Das, I. An Overview Of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Technology For Metal 3D Printing // Journal of Mines Metals and Fuels. 2022. Vol. 70, Issue 3A. P. 127. DOI: 10.18311/jmmf/2022/30681.
12. Imran, M. M., Idris, A. C., De Silva, L. C., Kim, Y.-B., Abas, P. E. Advancements in 3D Printing: Directed Energy Deposition Techniques, Defect Analysis, and Quality Monitoring // Technologies. 2024. Vol. 12, Issue 6. Article Number 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12060086>.
13. Feenstra, D., Banerjee, R., Fraser, H. L., Huang, A. Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2021. Vol. 25, Issue 4. P. 100924. DOI: 10.1016/j.cossms.2021.100924.
14. Gu Yijia, Yuan Jiandong, Chen Lianyi. Switching of controlling mechanisms during the rapid solidification of a melt pool in additive manufacturing // Phys. Rev. Materials. – 2023. – Vol. 7, No. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.7.103401>
15. Dela Cruz M. S. B., Fukuda T., Inamura T., Hosoda H. Microstructure evolution in laser powder bed fusion-built Fe–Mn–Si shape memory alloy // Microstructures. – 2023. – Vol. 3. – Article № 2023012. – DOI: <https://doi.org/10.20517/microstructures.2022.33>
16. Webster S., Jeong J., Zha R., Liao S., Castro A., Jacquemetton L., Beckett D., Ehmann K. & Cao J. In situ, parallel monitoring of relative temperature, material emission, and laser reflection in powder-blown directed energy deposition // JOM. – 2024. – Vol. 76, pp. 6615–6638. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06837-3>

17. Lashkary R., Bagheri Z. A comprehensive review of In-Situ monitoring and control techniques in directed energy deposition process // *J. Manuf. Process.* 2023. Vol. 98. P. 134–157. DOI: [10.1016/j.jmapro.2023.05.021](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.021).
18. Xiao B, Ye Z. Selective laser sintering: Processing, materials, challenges, applications, and emerging trends. *J Adv Therm Sci Res.* 2024; 11: 65-99. DOI: <https://doi.org/10.15377/2409-5826.2024.11.4>
19. Prashanth G.,K. Selective Laser Melting: Materials and Applications. *J. Manuf. Mater. Process.* 2020, 4(1), 13; <https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>
20. Zhang J, Song B, Wei Q, Bourell D, Shi Y (2019) A review of selective laser melting of aluminium alloys: processing, microstructure, property and developing trends. *J Mater Sci Technol* 35:270–284 <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>
22. Humnabad, P.S.; Tarun, R.; Das, I. An Overview Of Direct Metal Laser Sintering for Metal 3D Printing // *J. Mines Met. Fuels.* 2022. Vol. 70, No. 3A. P. 127–133. DOI: [10.18311/jmmf/2022/30681](https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/30681).
22. Kushwaha A.K., Rahman M.H., Slater E., Patel R., Evangelista C., Austin E., Tompkins E., McCarroll A., Rajak D.K., Menezes P.L. Powder bed fusion–based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS // *Tribology of Additively Manufactured Materials* / ed. by P. Kumar, M. Misra, P.L. Menezes. – Amsterdam : Elsevier, 2022. – P. 1–37. – (Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering). DOI: [10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9)
23. Imran, M. M., Idris, A. C., De Silva, L. C., Kim, Y., & Abas, P. E. Advancements in 3D Printing: Directed Energy Deposition Techniques, Defect Analysis, and Quality Monitoring. *Technologies.* 2024. Vol. 12, iss. 6, art. no. 86. DOI: [10.3390/technologies12060086](https://doi.org/10.3390/technologies12060086).
24. Ghasempour-Mouziraji, M., Afonso, D., Nemati, B., & de Sousa, R. A. Directed Energy Deposition: A Scientometric Study and Its Practical Implications. *Metrics.* 2025. Vol. 2, iss. 3, art. no. 14. DOI: [10.3390/metrics2030014](https://doi.org/10.3390/metrics2030014).
25. Izadi M., Farzaneh A., Mohammed M., Gibson I., Rolfe B. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts // *R. Prototyp. J.* 2020. Vol. 26, № 6. P. 1059–1078. DOI: [10.1108/RPJ-04-2018-0088](https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2018-0088).
26. Webster, S. In-situ, Parallel Monitoring of Relative Temperature, Material Emission, and Laser Reflection in Powder-Blown Directed Energy Deposition / S. Webster, C. Stott, J. Johnson // *JOM.* – 2024. DOI: [10.1007/s11837-024-06837-3](https://doi.org/10.1007/s11837-024-06837-3).
27. Kushwaha, A.K. Powder bed fusion–based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS / A.K. Kushwaha, M. El-Desouky, A. Verma // *Tribology of Additively Manufactured Materials.* – 2022. – P. 1–37. DOI: [10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9)
28. Hajnys J., Pagáč M., Kotera O., Petru J., Scholz S. Influence of basic process parameters on mechanical and internal properties of 316L steel in SLM process for Renishaw AM400. *MM Sci. J.* 2019. doi:[10.17973/MMSJ.2019_03_2018127](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_03_2018127).
29. Adjamskyi, S. V., Kononenko, H. A., & Podolskyi, R. V. (2021). Improving the efficiency of the SLM-process by adjusting the focal spot diameter of the laser beam. *Paton Weld. J.*, (5), 18–23. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.03>
30. Vaudreuil, S., Bencaid, S.-E., Vanaei, H. R., & El Magri, A. (2022). Effects of Power and Laser Speed on the Mechanical Properties of AlSi7Mg0.6 Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, 15(23), 8640. <https://doi.org/10.3390/ma15238640>
31. Maamoun, A. H., Tarlochan, F., Olabi, A. G., & Al-Marzooqi, A. H. (2018). The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys. *Materials*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/ma12010012>

32. Khaimovich, A., Balyakin, A., Oleynik, M., Meshkov, A., Smelov, V. Optimization of process parameters for powder bed fusion additive manufacturing using a linear programming method: a conceptual framework. *Metals*, 2022, T. 12, N 11, с. 1976. DOI: 10.3390/met12111976.
33. Lee, H., Lim, C. H. J., Low, M. J., Tham, N., Murukeshan, V. M., Kim, Y. J. Lasers in additive manufacturing: A review. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, 2017, 4(3): 307-322. DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7.
34. Chadha, U. [et al.]. Directed Energy Deposition via Artificial Intelligence-Enabled Approaches. *Complexity*. 2022. Vol. 2022. P. 1-32. DOI: 10.1155/2022/2767371.
35. Gribova, V. [et al.]. A Multi-Model Ontological System for Intelligent Assistance in Laser Additive Processes. *Appl. Sci.* 2025. Vol. 15, № 8. P. 4396. DOI: 10.3390/app15084396.
36. Ramli, S. M. Q. M., Fadzil, N. A., Ghazali, H., Viklund, P., Ali, W. F. F. W. Essential characterization of metal powder for additive manufacturing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1173, Issue 1. Article Number 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1173/1/012062.
37. Jiang H., Ren Y., Tian Y., Caballero A. O. Recent Advances in Metal Powder-Based Additive Manufacturing. *Mater.* 2023;16(11):3975. <https://doi.org/10.3390/ma16113975>
38. Yarovytsyn, O.V., Mykytchyk, A.V., Oliynyk, Y.V. New Process Requirements for Additive Powders for Microplasma Powder Deposition. *Powder Metall Met Ceram* 62, 276–292 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00392-3>
39. Vock, S., Klöden, B., Kirchner, A. et al. Powders for powder bed fusion: a review. *Prog Addit Manuf* 4, 383–397 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
40. Weaver JS, Whiting J, Tondare V, Beauchamp C, Peltz M, Tarr J, Phan TQ, Donmez MA. The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Addit Manuf.* 2021;39:10.1016/j.addma.2021.101851. doi: 10.1016/j.addma.2021.101851.
41. Garboczi E.J., Hrabe N. Particle shape and size analysis for metal powders used for additive manufacturing: technique description and application to two gas-atomized and plasma-atomized Ti-64 powders» – *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100965. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100965.
42. Slotwinski, J. A., Garboczi, E. J., Stutzman, P. E., Ferraris, C. F., Watson, S. S., Peltz, M. A. Metal Powders for Additive Manufacturing: Characterization and Standards // *J Res Natl Inst Stand Technol.* 2014. Vol. 119. P. 460–493. DOI: 10.6028/jres.119.018.
43. Tamayo, J. A., Riascos, M., Vargas, C. A., Baena, L. M. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy via electron beam melting for the development of implants for the biomedical industry // *Heliyon.* 2021. Vol. 7, Issue 5. Article Number e06892. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06892.
44. Gadlegaonkar, N., Bansod, P. J., Lakshmikanthan, A., Bhole, K. A Review on Additively Manufactured AlSi10Mg Alloy: Mechanical, Tribological, and Microstructure Properties // *Journal of Mines Metals and Fuels.* 2025. Vol. 73, Issue 1. P. 87–101. DOI: 10.18311/jmmf/2025/46621.
45. Mehta B., Svanberg A., Nyborg L. Laser Powder Bed Fusion of an Al-Mg-Sc-Zr Alloy: Manufacturing, Peak Hardening Response and Thermal Stability at Peak Hardness // *Metals.* – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 57. – DOI: [10.3390/met12010057](https://doi.org/10.3390/met12010057)
46. Daňa, M., Zetková, I., Mach, J. Mechanical Properties of Inconel Alloy 718 Produced by 3D Printing using DMLS // *MANUFACTURING TECHNOLOGY.* 2018. Vol. 18, Issue 4. P. 559–562. DOI: 10.21062/ujep/137.2018/a/1213-2489/MT/18/4/559.

47. Johnson, J., Kujawski, D. Additively Manufactured Inconel 718 Low-Cycle Fatigue Performance // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, Issue 3. Article Number 1653. DOI: 10.3390/app15031653.
48. D'Andrea, D. Additive Manufacturing of AISI 316L Stainless Steel: A Review // *Metals*. 2023. Vol. 13, Issue 8. Article Number 1370. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13081370>.
49. Carminati, M., Quarto, M., D'Urso, G., Giardini, C., Maccarini, G. Mechanical Characterization of AISI 316L Samples Printed Using Material Extrusion // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Issue 3. Article Number 1433. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031433>.
50. Sumanariu, C. A., Amza, C. G., Baciu, F., Vasile, M. I., Nicoara, A. I. Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional vs. Additive Manufacturing for Stainless Steel 316L // *Materials*. 2024. Vol. 17, Issue 19. Article Number 4808. DOI: 10.3390/ma17194808.
51. Edelmann, A., Riedel, L., Hellmann, R. Realization of a Dental Framework by 3D Printing in Material Cobalt-Chromium with Superior Precision and Fitting Accuracy // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, Issue 23. P. 5390. DOI: 10.3390/ma13235390.
52. Von Lintel, H., Evsiutkina, E., Haase, C., Krupp, U., Jahns, K. Copper alloys for additive manufacturing: Laser powder bed fusion of CuCr1Zr by using a green qcw-laser // *European Journal of Materials*. 2023. Vol. 3, Issue 1. Article Number 2115945. DOI: 10.1080/26889277.2022.2115945.
53. Morshed-Behbahani, K., Aliyu, A., Bishop, D. P., Nasiri, A. M. Additive Manufacturing of Copper-based Alloys for High-temperature Aerospace Applications: A Review // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 38. P. 108395. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.108395.
54. Naimi, S., Hosseini, M. Tool Steels in Die-Casting Utilization and Increased Mold Life // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 7, Issue 1. DOI: 10.1155/2014/286071.
55. Yuan, M., Karamchedu, S., Fan, Y., Liu, L., Nyborg, L., Cao, Y. A Case Study for a Worn Tool Steel in the Hot Stamping Process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 22. P. 1065–1075. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.006.
56. Illarionov A. G., Stepanov S. I., Naschetnikova I. A., Popov A. A., Soundappan P., Thulasi Raman K. H., Suwas S. A Review—Additive Manufacturing of Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide Ti₂AlNb // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 3. – P. 991. – DOI: [10.3390/ma16030991](https://doi.org/10.3390/ma16030991)