

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ТКАЧЕНКО Tetiana Volodymyrivna – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Solo Singing and Opera Training of Kharkiv I. P. Kotliarevskyi National University.

Scientific interests: performance training of art majors.

SHUMSKA Olha Oleksandrivna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Piano of Kharkiv Humanitarian-Pedagogical Academy.

Scientific interests: performance training of art majors.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2023 р.

УДК 37.012.3 : 621.744.072.2

DOI: 10.36550/2415-7988-2022-1-209-301-307

ТКАЧУК Андрій Іванович –

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри технологічної та професійної освіти

Центральноукраїнського державного університету

імені Володимира Винниченка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-0107>

e-mail: atkachuk08@meta.ua

ПИТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ТА ПРИ ВИВЧЕННІ ПРОЦЕСІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуті нові підходи при вивченні студентами освітньої програми Середня освіта (Трудове навчання та технології) особливостей адитивних технологій виробництва й обробки сучасних конструкційних металевих матеріалів, як однієї зі складових тем дисциплін "Основні процеси обробки матеріалів (металів)", "Технології обробки матеріалів", "Технологічний практикум з основних технологій (металевих матеріалів)", "Практикум з технологій" за рахунок більш ефективного компонування та подачі відповідного лекційного матеріалу з допомогою системи мультимедійних презентацій під час лекційних і лабораторних занять у форматі відео-конференції на платформі Google Meet в умовах дистанційного навчання. Показано, що більш ретельного дослідження й опрацювання студентами потребують питання, які пов'язані з такими методами адитивних технологій, як Powder Bed Fusion і Direct Energy Deposition. Проаналізовано особливості викладення навчального матеріалу про характеристики і робочі параметри таких зрілих адитивних технологій 3D-друку металевих виробів, як SLS, DMLS, SLM, LENS, EBM, EBAM. Запропоновано, що при опрацюванні даного навчального матеріалу, студентам слід наголосити, що однією з самих розповсюджених є адитивна технологія газопорошкової лазерної плавки (Laser Engineered Net Shaping), яка належить до DED Additive Manufacturing. Реалізація цієї технології полягає у прямому підведенні металевого порошку в зону розплавлення, з наступним сплавленням його лазером. Підведення порошку здійснюється під тиском у повітрі чи в потоці інертного газу. Перевагами LENS є можливість: локальної обробки, гібридного виготовлення та ремонту великогабаритних, складнопрофільних і тонкостінних виробів; нанесення захисних покриттів; використання різних металопорошкових композицій. Недоліком LENS є велика витрата порошку через особливості процесу. Для виготовлення великогабаритних деталей простої геометрії також застосовується Electron Beam Additive Manufacturing, при якій в зону плавлення здійснюється пряме підведення металевого дроту з подальшим його сплавленням електронним променем з попередніми шарами ("зрізами") металевого виробу.

Ключові слова: методика вивчення обробки конструкційних матеріалів, адитивні технології 3D-друку металів.

ТКАЧУК Andriy Ivanovych –

candidate of technical sciences, associate professor,

associate professor of the department of technological

and professional education of the Volodymyr

Vynnychenko Central Ukrainian State University.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-0107>

e-mail: atkachuk08@meta.ua

THE ISSUE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN SCIENTIFIC RESEARCH AND IN THE STUDY OF PROCESSES AND TECHNOLOGIES OF MODERN CONSTRUCTION MATERIALS

The article examines new approaches to the study by students of the Secondary Education (Labor Training and Technologies) of the features of additive technologies for the production and processing of modern structural metal materials, as one of the constituent topics of the disciplines "Basic processes of processing materials (metals)", "Technologies of processing materials (metals)", "Technology workshop on basic technologies (metal materials)", "Technology workshop (metal materials)". This is realized due to more effective composition and presentation of appropriate lecture material using a system of multimedia presentations during lecture and laboratory classes in the format of video conferences on the Google Meet platform in conditions of distance learning. It is shown that questions related to such methods of additive technologies of production and processing of metal materials as Powder Bed Fusion and Direct Energy Deposition require more thorough research and study by students. The peculiarities of teaching material on the characteristics and working parameters of such mature additive technologies of 3D printing of metal products as SLS, DMLS, SLM, LENS, EBM, EBAM were analyzed. It is

suggested that when processing this educational material, students should emphasize that one of the most widespread is the additive technology of gas-powder laser melting (Laser Engineered Net Shaping), which belongs to DED AM. The implementation of this technology consists in the direct introduction of metal powder into the melting zone, followed by its fusion with a laser. Supply of powder is carried out under pressure in air or in a stream of inert gas. The advantages of LENS are the possibility of: local processing, hybrid manufacturing and repair of large-sized, complex profile and thin-walled products; application of protective coatings; the use of various metal powder compositions. The disadvantage of LENS is the high consumption of powder due to the peculiarities of the process. In the Electron Beam Melting technology, the part is formed by spot melting of metal powder with an electron beam in a vacuum at high temperatures (600-1100 °C). The use of an electron gun allows you to control an electron beam with the help of magnetic fields at very high speeds. Electron Beam Additive Manufacturing is also used for the manufacture of large-sized parts of simple geometry, in which a metal wire is directly introduced into the melting zone, followed by its fusion with an electron beam with previous layers ("slices") of a metal product.

Keywords: methodology of studying the processing of structural materials, additive technologies of 3D-printing of metals.

Постановка та обґрунтування актуальності проблеми. Сучасні технології виробництва та обробки металевих деталей зі складною формою і геометрією поверхні в єдиному циклі базуються на механосубтрактивних багатофункціональних док-станціях з ЧПК та адитивних 3D-принтерах з програмним керуванням. Передові технології 3D-друку порошковими металами та їх сплавами здатні ефективно замінити класичні технології обробки й виробництва (штампування, лиття, зварювання, точіння тощо) при одержанні з високими точністю і цільністю складних за структурою і формою металевих виробів декоративно-ужиткового мистецтва, ювелірної справи, протезно-імплантатної медицини, автомобіле- і літакобудування, ракетно-космічної техніки, наприклад, лопатки газових турбін, коронки, ортопедичні титанові протези, форсунки реактивних двигунів, й навіть сопло ракетного двигуна Raptor з інтегрованою в його структуру системою охолодження для надважкої системи космічного запуску багаторазового використання *Super Heavy – Starship* американської компанії *SpaceX* [1; 2].

До основних переваг технології 3D-друку металами та їх сплавами відносяться: "1) економія матеріалу (коефіцієнт використання матеріалу може сягати 98 %) разом з високою точністю і повторюваністю при виробництві; 2) скорочення циклу науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, забезпечуючи створення складнопрофільних деталей без використання механічної обробки і дорогих оснасток; 3) зменшення маси виробу за рахунок створення його структур з внутрішніми порожнинами; 4) вирішення складних технологічних завдань, пов'язаних з виготовленням геометрично складних виробів; 5) одержання механічних характеристик металевих виробів, надрукованих на 3D-принтері, що співставні з якістю та експлуатаційними характеристиками лиття" [3; 4; 7].

Саме тому, в умовах існуючого освітнього середовища в ЗВО при вивченні дисциплін "Основні процеси обробки матеріалів (металів)", "Технології обробки матеріалів (металів)", а також "Технологічного практикуму з основних технологій (металевих матеріалів)" і "Практикуму з технологій (металевих матеріалів)" на першому (бакалаврському) рівні технологічної і професійної освіти, постає потреба більш ретельного розгляду відповідних питань про сучасні адитивні технології металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В

сучасній науковій і навчально-методичній літературі приділено багато уваги проблемам вивчення студентами ЗВО різних технологій виробництва та обробки конструкційних матеріалів [2; 4; 5; 7; 8]. Проте, саме аспект вдосконалення лекційного і практичного матеріалу для технологій і процесів обробки металевих матеріалів про особливості, характеристики сучасних адитивних технологій 3D-друку металів залишається недостатньо висвітленим.

Метою статті є обговорення та висвітлення нових підходів при вивченні питань про адитивні технології обробки металевих матеріалів у процесі викладання навчальних дисциплін "Основні процеси обробки матеріалів" і "Технології обробки матеріалів".

Методи дослідження: вивчення, порівняльний аналіз, узагальнення, систематизація науково-методичної та науково-практичної літератури з теми дослідження; системний і проблемно-пошуковий методи для обґрунтування шляхів удосконалення процесу вивчення особливостей сучасних адитивних технологій 3D-друку металів та їх сплавів.

Виклад основного матеріалу дослідження. При вивченні студентами ЗВО навчального матеріалу про адитивні технології 3D-друку (3D-printing) металів і їх сплавів слід наголосити, що власне *адитивні технології (АТ) (additive manufacturing, АМ)* – це процеси виготовлення тривимірних деталей (або їх частин), що засновані на створенні фізичного об'єкта за цифровою 3D-моделью шляхом послідовного додавання (нарощування) матеріалу шар за шаром, при цьому, в окремих випадках окремі частини кінцевої деталі можуть бути вирощені з різних матеріалів. За методом фіксації шару *АТ* можуть бути з допомогою сплавлення, склеювання, фотополімеризації. За технологією розігріву – нелазерні і лазерні. Витратні конструктивні матеріали в *АТ* можуть бути ниткоподібні (пруткові), сипучі (порошкові), рідкі, листові (плівкові). Для створення цифрового опису виробів – 3D-моделей, можуть використовуватися САПР чи САД-системи, файли з якими зберігаються в спеціальному форматі STL з подальшим використанням програм-слайсерів при підготовці моделей до друку [6; 7].

Так, розглядаючи із студентами *АТ*, потрібно наголосити, що загалом, їх існує ~30. Вони відрізняються між собою методом нанесення і з'єднання шарів конструкційного матеріалу та видами матеріалів. За міжнародним стандартом

ISO/ASTM 52900:2015 існують 7 типів/класів *AT* (рис. 1): 1) екструзія (видавлювання) конструкційного матеріалу (*Material Extrusion*), при якій розплавлений матеріал вибірково подається через сопло чи жиклер (екструдер) для пошарового нанесення, видами *AT* є *FDM*; 2) струменеве пошарове нанесення (розбризування) зв'язуючого матеріалу (*Binder Jetting*), при якому порошкові матеріали з'єднуються вибірково нанесенням рідкого сполучника, видами *AT* є *BJ*; 3) фотополімеризація у ванні (*Vat Photopolymerization*), при якій рідкий фотополімер (смола) вибірково пошарово твердне (полімеризується) у ванні електромагнітним світловим випромінюванням, видами *AT* є *SLA*, *DLP*, *CDLP*; 4) струменеве нанесення (розбризування) конструкційного матеріалу (*Material Jetting*), коли виготовлення об'єкта здійснюють пошаровим нанесенням крапель конструкційного матеріалу, видами *AT* є *MJ*, *NPJ*, *DOD*; 5) синтез на підкладці ("розплавлення матеріалу в попередньо сформованому шарі") (*Powder Bed Fusion*), коли енергія від зовнішніх джерел застосовується для вибіркового спікання (сплавлення) попередньо нанесеного шару матеріалу (порошкового чи дротового), видами *AT* є *MJF*, *SLS*, *DMLS*, *EBM*; 6) пряме підведення енергії і матеріалу (*Direct Energy Deposition – DED*), при якому енергія від зовнішнього джерела енергії використовується для з'єднання матеріалів шляхом їх сплавлення в процесі нанесення, видами *AT* є *SLM*, *LENS*, *EBAM*; 7) листові ламінації (поєднання листових матеріалів) (*Sheet Lamination*), при якій виготовлення деталі здійснюється пошаровим з'єднанням листів конструкційного матеріалу, *AT – LOM* [2; 4].

Зараз в світі налічується десятки провідних

компаній-виробників 3D-принтерів для друку металами та їх сплавами (рис. 2). До них відносяться: SLM Solutions, EOS, Concept Laser, Renishaw, Realizes (ФРН); Phenix Systems, Irep Laser (Франція); Arcam (Швеція); Optomec, Systems, Sciaky, POM Group (США); Trump Precision Machinery, Beijing Long Yuan Automated Fabrication Systems (КНР); InssTek (ІПК) та ін. [7; 8].

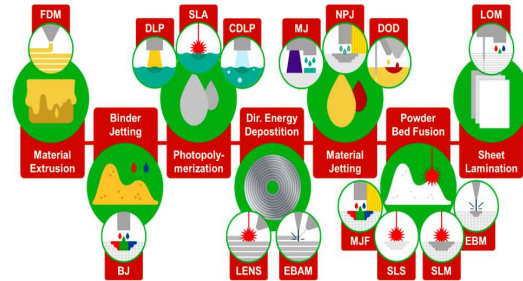


Рис. 1. Типи *AT* за міжнародним стандартом ASTM F2792.1549323-1

Для 3D-друку металів і сплавів в якості сировини використовуються *металеві порошки*, що містять сферичні гранули розміром 4-80 мкм. За складом ці порошки поділяються на: 1) *сталеві* – інструментальні (марок 1.2709, 1.2343, 1.2367), нержавіючі (марок AISI410, AISI304L, AISI316L, AISI904L), нікелево-хромові (Inconel625, Inconel718); 2) з *кольорових металів і їх сплавів* – титанові (Ti64, TiAl4V, друк лише в середовищі інертного газу Ar), алюмінієві (друк лише в середовищі інертного газу Ar), кобальт-хромові, мідні (бронзові й латунні, як добавка до пластикового філаменту) та ін. З дорогоцінними металами (срібло, золото, платина) може працювати багато сплавлених шарів порошку 3D-принтерів [2; 4].



Рис. 2. Найкращі базові 3D-принтери для друку металів в 2023 році

Студентам слід акцентувати увагу на тому, що для виготовлення й обробки металевих виробів 3D-друком можна виділити як зрілі технології (*SLS*, *SLM*, *LENS*, *EBM*, *EBAM*, *Metal BJ*), що вже використовуються в промисловості, так і нові, які розвиваються (*MCP*, *MHD (Material Jetting)*, *MELD*). *AT* металів можна порівнювати за основними характеристиками (обсягом робочої камери, товщиною шару, який може наноситись за

раз, продуктивністю, вартістю, конструкційними матеріалами), що впливають на параметри заготовки або деталі: розміри, точність/шорсткість, вартість, час виготовлення, фізико-механічні характеристики. Для *AT із синтезом на підкладці* для 3D-друку використовуються порошкові матеріали, пошарове нанесення порошку, з'єднання частинок порошку з виробом за допомогою випромінювача енергії (лазера чи електроно-

променевої гармати) [7; 8].

Selective Laser Sintering (SLS) – *селективне (вибіркове) лазерне спікання* – *АТ* металевого виробництва шляхом вибіркового й пошарового сканування потужним лазерним випромінюванням поверхні спресованого дрібнодисперсного порошку (рис. 3). Суть **SLS АТ** полягає у точковому спіканні частинок шару порошку, яке проходить за певною стратегією сканування (лазерна установка через рухоме скануюче дзеркало спрямовує промінь на необхідну ділянку порошку, спікаючи шар за шаром). Після завершення спікання попереднього шару ("зрізу" виробу), платформа з нарощуваною деталлю та оточуючим її попереднім порошком в робочій камері опускається на один крок вниз, й установка наносить вирівнюючим механізмом тонкий новий шар порошку поверх попередніх, в якому знову відбувається спікання нового шару деталі. Цей процес повторюється до виготовлення деталі, а її нарощування йде знизу→вгору. Для забезпечення достатньої жорсткості конструкції і тепловідведення до поверхонь, що сильно нависають (<45° між поверхнею і основою), підводять спеціальні підтримуючі структури. Ця технологія використовується при виготовленні деталей надскладної геометрії. Перевагами **SLS АТ** є: висока роздільна здатність у горизонтальній площині; товщина шару від 20 до 200 мкм; великий перелік використовуваних порошків (Cu, Al, Fe, Ti, Ni, CoCr та ін. – для **SLS** друку доступні удароміцні, зносостійкі, жаростійкі, гнучкі, інженерні і термостійкі металеві порошки); велика область побудови у 3D-принтерах, що дозволяє виконувати дрібносерійне виробництво; висока якість 3D-друку (**SLS АТ** дозволяє практично повністю уникнути видимої пошаровості на моделі); висока швидкість та продуктивність нарощування за рахунок того, що матеріал не плавиться повністю (часткове плавлення порошку, необхідне лише для його об'єднання в єдиний елемент виробу). Недоліки **SLS АТ**: погіршення властивостей порошку при повторному використанні матеріалів; необхідність постобробки пористої деталі [7; 8].

Окремим різновидом **SLS АТ** є **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)** – *пряме лазерне спікання металів*, що призначене для роботи з чистими металевими порошками. Установки для **DMLS** (рис. 4) часто оснащують герметичною робочою камерою, яка наповнюється інертними газами для нейтралізації інтенсивної окисації активних металів, наприклад, титану. В **DMLS**-принтерах застосовують попередній нагрів витратного матеріалу до температури, що трохи нижче за температуру його плавлення. Це дозволяє прискорити процес друку і зекономити на потужності лазерної установки, яка своїм променем здійснює спікання частинок металевого порошку між собою та з попереднім сформованим шаром ("зрізом") деталі. При такому друці, наприклад, товщини нарощуваних шарів титану можуть сягати 20-50 мкм а кінцева деталь мати досить складну форму при високій міцності.

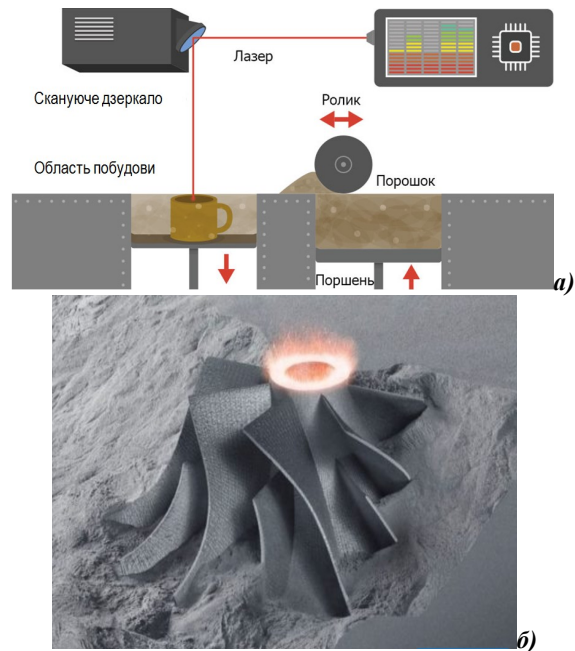


Рис. 3. Схема установки (а) і сам виріб (б) **SLS АТ** металів

Студентам також слід пояснити, що окрема адитивна технологія 3D-друку металів **селективного (вибіркового) лазерного сплавлення (Selective Laser Melting, SLM)**, яку вперше розробила компанія SLM Solutions, за своїми ключовими особливостями дуже схожа на **SLS**, але для формування чергового шару ("зрізу") деталі вона забезпечує не часткове плавлення та спікання окремих частинок рівномірно розподіленого по поверхні робочої камери металевого порошку, як при **SLS**, а повне їх плавлення для утворення монолітних шарів виробу без мікропорожнин. Так, металевий 3D-принтер SLM 280 PS (рис. 5) з об'ємом робочої області $280 \times 280 \times 365 \text{ мм}^3$ здатний своєю подвійною лазерною системою (на 400, 700 або 1000 Вт кожний) з мах швидкістю нарощування $113 \text{ см}^3/\text{год}$. (сканування 10 м/с) при товщині сплавлення шару 20-90 мкм формувати вироби надскладної геометрії масою до 1700-2600 кг. Стратегія багатолазерного сканування в Production Series дозволяє мінімізувати інтерференцію сажі та змінювати режими "зшивки" шарів порошку. Ламінарний потік інертного газу через робочу камеру створює чисте технологічне середовище та підвищує якість нарощування деталі протягом усього процесу збирання. Транспортування, просіювання через сито і зберігання металевого порошку здійснюються автоматично в атмосфері інертного газу для збереження його якості. 3D-принтер використовує марки металевих порошків на основі сплавів: міді (CuNi2SiCr, CuCr1Zr); алюмінію (AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6); нікелю (HX, IN625, IN718, IN939); заліза (316L (1.4404), 15-5PH (1.4545), 17-4PH (1.4542), 1.2709, H13 (1.2344), Invar36, 1.4828); титану (Ti6Al4V ELI (Grade23), TA15, Ti (Grade2); кобальту (CoCr28Mo6, SLM MediDent) [7; 9].



Рис. 4. DMLS-принтер і його титанові вироби

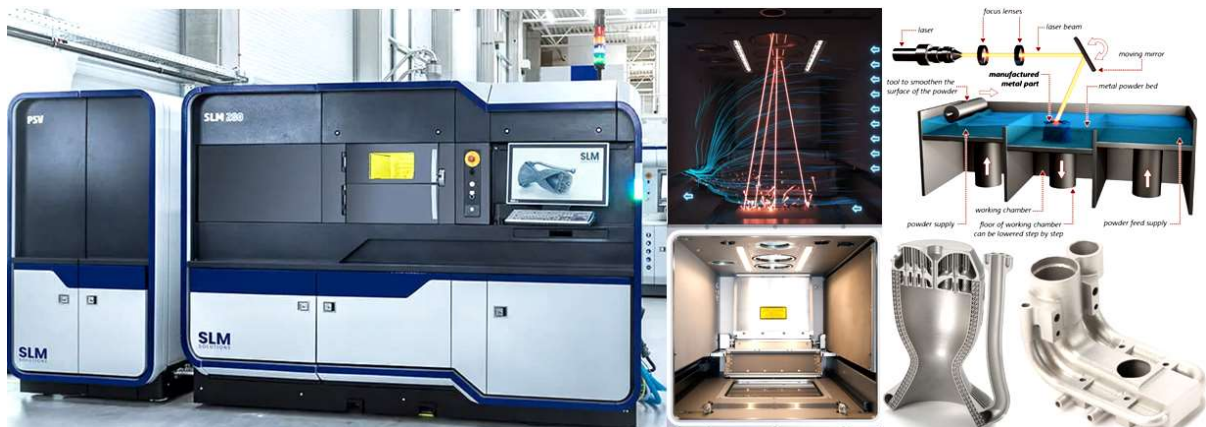


Рис. 5. Metal 3D Printer SLM 280 PS, його робоча камера і вироби

Важливим для розгляду студентами питанням є адитивна технологія *газопорошкової лазерної плавки (Laser Engineered Net Shaping, LENS)*, що належить *AM* прямого підведення енергії та матеріалу (*DED*), суть якої полягає у прямому підведенні металевому порошку в зону розплавлення, з наступним сплавленням його лазером. Підведення порошку здійснюється під тиском у повітрі чи в потоці інертного газу (рис. 6). Перевагами *LENS* є можливість: локальної обробки, гібридного виготовлення та ремонту великогабаритних, складнопрофільних і тонкостінних виробів; нанесення захисних покриттів; використання різних металопорошкових композицій. Недоліком *LENS* є велика витрата порошку через особливості процесу [4].

Electron Beam Melting (EBM) – електронно-променевоє сплавлення – AT, схожа на *SLS/DMLS*, тільки тут деталь формується шляхом точкового плавлення металевому порошку електронним променем у вакуумі при високих температурах (600-1100 °C) (рис. 7). Використання електронної гармати дозволяє керувати електронним променем з допомогою магнітних полів на швидкостях, значно більших, ніж електромеханічних дзеркальних систем для лазерних установок *SLS/DMLS/SLM*. Ця особливість дозволяє *EBM* друкувати металевими матеріалами, які схильні до розтріскування при виготовленні за технологією *DMLS/SLM*, наприклад, інтерметалідом TiAl (Ti48Al2Cr2Nb). Ця

AT використовується при виготовленні деталей надскладної геометрії. Переваги *AT EBM*: висока роздільна здатність у горизонтальній площині; товщина шару від 50 до 200 мкм; великий перелік використовуваних металевих порошоків; потрібно менше підтримуючих конструкцій, порівняно з *SLS*. Недоліки є низька продуктивність [7; 8].

Виділяють також *AT Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – дрютяна наплавка електронним променем*, яка також відноситься до *AT* прямого підведення енергії та матеріалу (*DED*). Її особливість полягає в тому, що в зону плавлення відбувається пряме підведенні металевому дроту з подальшим його сплавленням з попередніми шарами ("зрізами") електронним променем (рис. 8). Ця *AT* використовується при виготовленні великогабаритних деталей простої геометрії. Її перевагами є висока продуктивність і габарити 3D-друку; високі механічні властивості заготовки. Недоліками є відносна низька точність [7; 8].

AT низькотемпературного 3D-друку металів *Atomic Diffusion Additive Manufacturing* використовує порошок з вкритими синтетичною сполучною речовиною металевими частинками, що видаляється після друку і дозволяє частинкам металу з'єднатися в єдине ціле за допомоги атомної дифузії. *AT Bound Metal Deposition* реалізує 3D-друк на принтері Studio металевим філаментом, після якого виріб запікається в печі при температурі 1400 °C.

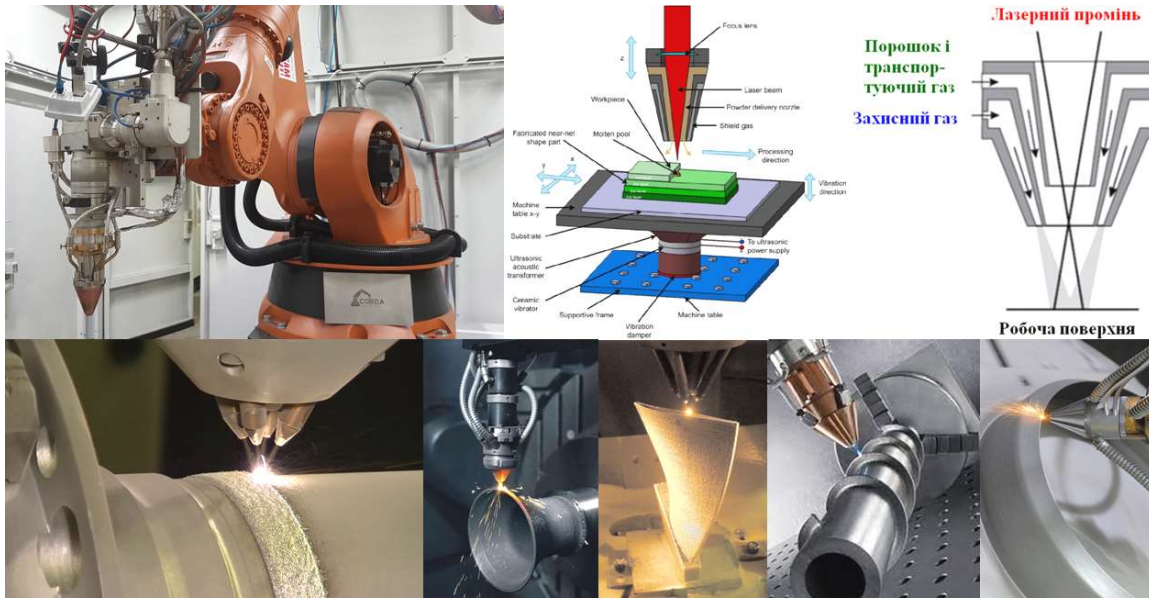


Рис. 6. АТ газопорошкової лазерної плавки та її вироби

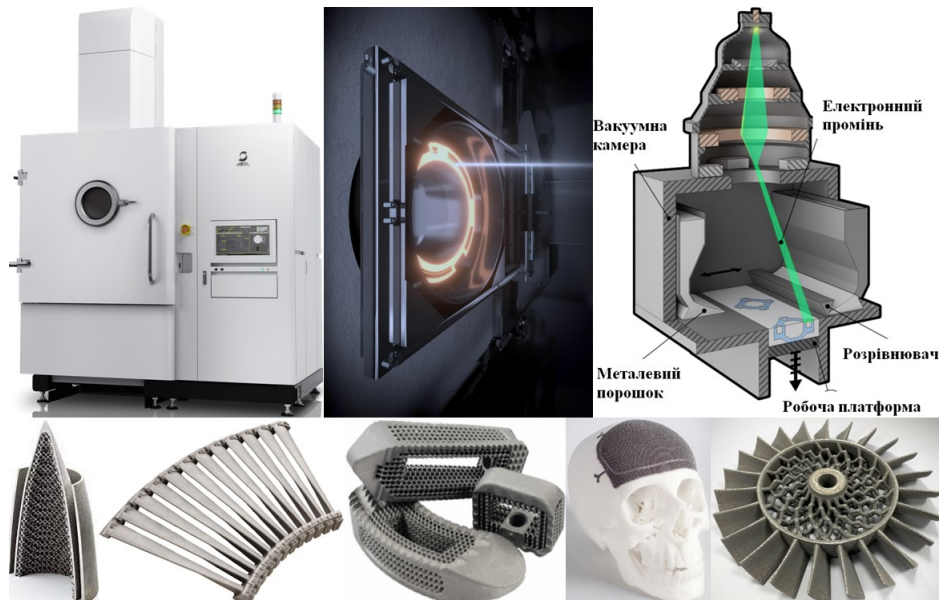


Рис. 7. АТ Electron Beam Melting та її вироби

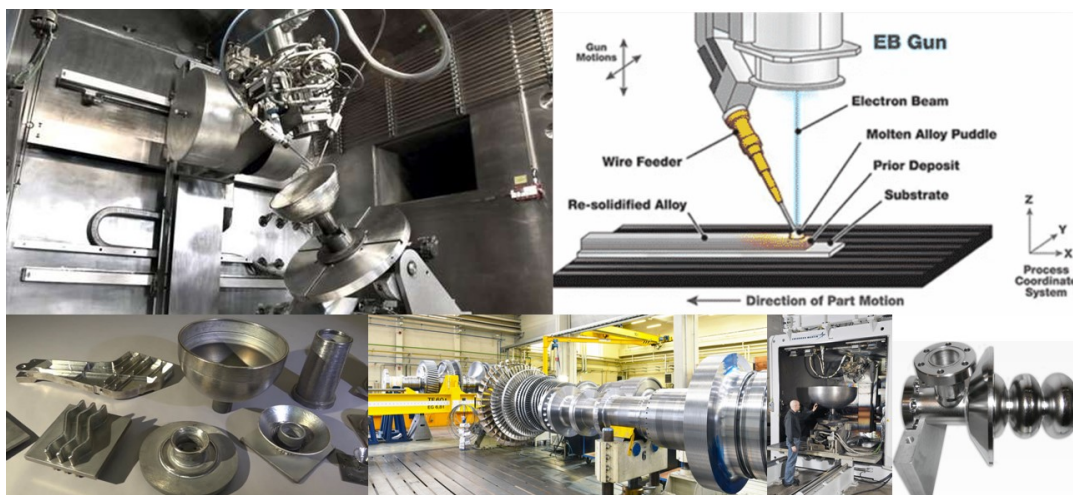


Рис. 8. *AT Electron Beam Additive Manufacturing* та її виробни

Висновки та перспективи подальших розвідок напрямку. Таким чином, вивчення характеристик та особливостей сучасних адитивних технологій 3D-друку металевих виробів, як однієї зі складових навчальних дисциплін "Основні процеси обробки матеріалів (металів)", "Технології обробки матеріалів", "Технологічного практикуму з основних технологій (металевих матеріалів)" і "Практикуму з технологій", є невід'ємною частиною процесу модернізації сучасної системи вищої освіти для підготовки фахівців-бакалаврів за освітньою програмою Середня освіта (Трудове навчання та технології). Повноцінне знання сучасних технологій адитивного виробництва типу *Powder Bed Fusion* і *Direct Energy Deposition (SLS, DMLS, SLM, LENS, EBМ, EBAM)* дозволить їм в подальшому використовувати можливості цих методів для навчання проектуванню та виготовленню складнопрофільних металевих виробів в машинобудуванні.

Перспективи подальших розробок пов'язані з аналізом наукових досліджень у напрямку проектування і застосування гібридних адитивних технологій обробки металевих матеріалів, та розробкою елементів методики їх вивчення в закладах вищої освіти.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Гречко О.М. (2019). Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1), С. 63–75.
2. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.
3. Муравйов О.В., Нижник Ю.М., Петрик В.Ф. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32, № 5. С. 114–119.
4. Пупань Л.І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності "Прикладна механіка" денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків: НТУ "ХПІ", 2023. 91 с.
5. Туташинський В.І. Технології сучасного виробництва: навчальний посібник / [Електронне видання]. Київ: КОНВІ ПРІНТ, 2021. 155 с.
6. Lam, Hugo K.S.; Ding, Li; Cheng, T.C.E.; Zhou, Honggeng (2019). The impact of 3D printing implementation on stock returns: A contingent dynamic capabilities perspective. *International Journal of Operations & Production Management*. 39 (6/7/8): P. 935–961.
7. Liza Wallach Kloski; Nick Kloski (2021). Getting Started with 3D Printing. 2nd Ed. Make Community, LLC. 256 p.
8. Ngo, T.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 143: 172–196.
9. Wang, Q.; Gao M.; Li, L.; Ma, Zh. (2021). Emergency-based environmental impact evaluation and modeling of

selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 115 (20): 1155–1169.

REFERENCES

1. Grechko, O.M. (2019). Modern additive technologies and 3D printing. Overview of recent advances in various spheres of human life. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, (1), S. 63–75. [in Ukrainian]
2. Manzhilevskiy, O.D.; Iskovych-Lotockiy, R.D. (2021). Suchasni adytyvni tehnologii 3D druku. Osoblyvosti praktychnogo zastosuvannya: navchal'nyj posibnyk [Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: Tutorial]. [in Ukrainian]
3. Muraviov O.V., Nyzhnyk Yu.M., Petryk V.F. (2021) Current state and development prospects of additive technologies. *Scientific notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical sciences*, 34 (5), S. 114–119. [in Ukrainian]
4. Pupan', L.I. (2023) Postprocesy adytyvnyh tehnologiy: navchal'nyj posibnyk [Post-processes of additive technologies: Tutorial]. [in Ukrainian]
5. Tutashynskiy, V.I. (2021) Tehnologii suchasnoho vyrobnytva: navchal'nyj posibnyk [Technologies of modern production: Tutorial]. [in Ukrainian]
6. Lam, Hugo K.S.; Ding, Li; Cheng, T.C.E.; Zhou, Honggeng (2019). The impact of 3D printing implementation on stock returns: A contingent dynamic capabilities perspective. *International Journal of Operations & Production Management*. 39 (6/7/8). P. 935–961. [in English]
7. Liza Wallach Kloski, Nick Kloski (2021). Getting Started with 3D Printing. 2nd Ed. Make Community, LLC. 256 p. [in English]
8. Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 143. P. 172–196. [in English]
9. Wang, Q.; Gao M.; Li, L.; Ma, Zh. (2021). Emergency-based environmental impact evaluation and modeling of selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 115(20). P.1155–1169. [in English]

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

ТКАЧУК Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічної та професійної освіти Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка.

Наукові інтереси: теорія та методика навчання (вивчення адитивних технологій обробки матеріалів).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

TKACHUK Andrij Ivanovych – PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Technological and Professional Education, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University.

Scientific interests: the theory and methodology of teaching (study of the additive technologies processing of materials).

Стаття надійшла до редакції 13.06.2023 р.