

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-93

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/01>**Габовда О.В.**

Мукачівський державний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГІБРИДНОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

У статті висвітлені переваги гібридного адитивного виробництва, розглянуті сучасні гібридні адитивні машини провідних світових компаній, проведений порівняльний аналіз їх технічних характеристик та адитивних технологій, на основі яких вони побудовані, надані рекомендації щодо виробів, які доцільніше виготовляти на цих машинах. Актуальність статті зумовлено невинним розвитком гібридних адитивних систем, які суміщають адитивні і субтрактивні процеси на одній виробничій платформі, в склад якої зазвичай входять багатівісний обробний центр і лазерні коаксіальні головки, для прямого осадження металевого порошку або дроту в залежності від використовуваної адитивної технології. Система дозволяє практично на будь-якій машині з ЧПК виконувати адитивні операції разом з фрезерними, токарними, шліфувальними та іншими в одній установці, причому різальні інструменти та лазерні головки розміщені у одному інструментальному магазині і подаються з нього у відповідності з послідовністю технологічного процесу обробки деталей завдяки оснащенню машин інтегрованими системами програмування. Досвід українських підприємств, на яких багато застарілого обладнання, у використанні адитивних технологій достатньо обмежений, особливо це стосується впровадження гібридних адитивних процесів. У статті висвітлені досягнення українських компаній, які розробляють нові оригінальні адитивні технології та обладнання. У зв'язку з війною в Україні ситуація на виробництві погіршується. Але в перспективі кардинальна трансформація українського виробництва є неминучою. Метою дослідження є порівняльний аналіз технічних характеристик та технологій найсучасніших гібридних адитивних машин як підґрунтя для більш ретельного підходу підприємств до придбання гібридного адитивного обладнання, а також переосмислення ролі інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності.

Ключові слова: гібридизація, адитивні технології, субтрактивні процеси, гібридні адитивні машини, інновації, конкурентоспроможність.

Постановка проблеми. Більшість деталей, виготовлених за допомогою адитивних технологій, проходять механічну пост-обробку у зв'язку з необхідністю забезпечити потрібну шорсткість поверхонь та більш жорсткі допуски. Спосіб остаточної обробки деталей після адитивного процесу багато, але у теперішній час з'явилася тенденція розробки систем, що поєднують адитивні (AM, Additive manufacturing) і субтрактивні (SM, Subtractive manufacturing) процеси, які виконуються на одній гібридній виробничій платформі, в склад якої входять багатівісний обробний центр і модуль AM, який реалізує одну з адитивних технологій. Переходи з операцій AM на SM відбуваються швидко, оскільки лазерні головки і різальні інструменти знаходяться в одному інструментальному магазині та подаються автоматично в техно-

логічній послідовності обробки деталі, яка реалізується за допомогою інтегрованого програмного забезпечення.

Гібридизація між AM та SM у даний час у світі стає практично стандартною практикою для виготовлення переважної більшості металевих деталей. На думку менеджера з технологій та бізнесу американської компанії Mitsui Seiki Робба Хадсона «рівень розвитку гібридної концепції настільки високий, що в найближчому майбутньому вона може бути розширена для інтеграції додаткових насадок для лазерного свердління і різання, локальної термічної обробки, конкретних операцій по очищенню поверхні заготовки, а також для сушіння залишків теплоносія» [1].

Швидкі темпи розвитку гібридного адитивного виробництва збільшують відставання України

у розвитку цієї наукомісткої галузі, яка потребує значних інвестицій. Оскільки інвестування будь-якої інноваційної діяльності в країні відбувається за власні кошти підприємств, у 2019 році тільки 13,8% промислових підприємств впроваджували інновації [2]. Крім того, підприємства недостатньо якісно відслідковують тенденції конкурентів з розвинутих країн та невірно оцінюють роль інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності.

Окремі провідні українські підприємства аерокосмічної, автомобільної промисловості, енергетики, такі як КБ «Південне», КБ «Антонов», мають досвід практичного використання АМ-технологій, наприклад, для виробництва деталей з композитних та полімерних матеріалів застосовується промислова американська адитивна система Stratasys F900, а також для виготовлення металевих деталей – німецька система SLM [3-4].

Дослідження у сфері адитивних технологій в Україні, повільно, але ведуться. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН на основі адитивних технологій проведені дослідження у галузі спеціальної металургії, зварювання та матеріалознавства, за результатами яких створено і експериментально підтверджено новітню наукову концепцію управління структурою металів та сплавів при їх кристалізації [5], а також розроблено устаткування для пошарового виготовлення металевих виробів методом електронно-променевого 3D-друку із застосуванням порошкових металевих матеріалів вітчизняного виробництва. Це обладнання орієнтоване на впровадження на підприємствах турбінобудування та авіакосмічної промисловості України [6].

Не можна не відмітити внесок української компанії ПРАТ«НВО «Червона хвиля» у розвиток адитивних технологій, яка винайшла ексклюзивну технологію адитивного виробництва електронним променем xBeam, в якій використовується унікальний порожнистий конічний електронний пучок у якості нагріву і коаксіальної подачі дроту в зону осадження. Ця технологія відрізняється від багатьох існуючих адитивних технологій на основі металевих дроту точністю, високою продуктивністю, простотою експлуатації та високим рівнем ефективності, завдяки чому компанія отримала замовлення на електронно-променеву систему xBeam-18/I від TWI – науково-дослідної та технологічної організації на базі Британського інституту зварювання [7].

В енергетичній галузі розглядаються перспективи для вітчизняної енергетики з точки

зору застосувань адитивних технологій [8], проводиться метрологічний аналіз можливостей національних еталонів України для забезпечення простежуваності вимірювань у сфері адитивного виробництва [9].

На промислових підприємствах України великий відсоток застарілого обладнання, яке в решті решт буде замінюватися. Правильний вибір сучасного обладнання пов'язаний з ретельним аналізом можливостей того чи іншого типу гібридних адитивних машин для конкретного типу виробів. Оскільки досвід України у використанні адитивних технологій дуже обмежений (особливо це стосується гібридних адитивних процесів), є потреба в їх аналізі для впровадження на підприємствах нашої країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті [10] аналізується доцільність перепрофілювання багатозадачних верстатів з ЧПК для лазерного адитивного виробництва шляхом розробки компактних головок для направлено осадження металу та методів їх інтеграції, які б не вимагали модифікації конструктивних частин верстату з ЧПК, а також відзначається метод осадження спрямованої енергії DED, як такий, що ілюструє на порядок більшу продуктивність у порівнянні з методом плавлення у порошковому шарі PBF (Powder bed fusion).

Огляд гібридних адитивних систем і процесів та переваги гібридного адитивного виробництва, а також практичні приклади застосування гібридних процесів надаються у [11]. У огляді компаній, що зосереджені на виробництві гібридного обладнання, описується остання версія системи AMBIT-AMBIT Series 7. Основою нової системи серії 7, крім серії лазерних головок, є універсальна док-станція у комплекті із вбудованим термічним та оптичним моніторингом процесів та контролем для гарантованої якості під час осадження, в якій використовується змінна вихрострумова головка, оптимізована для виявлення поверхневих і підповерхневих тріщин і порожнеч на кілька шарів у глибину за допомогою діапазону зондів, що працюють при частоті до 5МГц [12].

У документі «Глобальний звіт ринку гібридних адитивних машин для виробництва 2021 року» компанії Cognitive Market Research вказується, що регіонально цей ринок зосереджений у Північній Америці (США, Канада та Мексика), Європі (Великобританія, Німеччина, Франція, Італія, Іспанія та деякі інші); у Азіатсько-Тихоокеанському регіоні (Китай, Індія, Японія, Південна Корея, Австралія, Південно-Східна Азія); Пів-

денній Америці (Бразилія, Аргентина, Колумбія); Близькому сході та Африці (Саудівська Аравія, Південна Африка, Туреччина, Нігерія, ОАЕ). У звіті наведено компанії, що лідирують на цьому ринку [13].

Процеси розробки гібридних адитивних машин та інтеграція технологій адитивного виробництва з чистою обробкою на оброблюваних центрах з ЧПК, а також технічні характеристики сучасних машин представлені у статтях та на сайтах виробників [14-18].

Постановка завдання. Зважаючи на швидкі темпи розвитку у світі гібридного адитивного виробництва та актуальність його впровадження на підприємствах України, є потреба в окресленні переваг гібридизації, проведенні порівняльного аналізу технічних характеристик гібридних адитивних машин провідних світових компаній та технологій, які в них використовуються. Отримані результати досліджень можуть бути корисними для правильного вибору підприємствами сучасного обладнання для конкретного типу виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Гібридні верстати почали серійно випускати з 2013 року, після заснування британської компанії Hybrid Manufacturing Technologies, яка розробила систему AMBIT, що включає в себе серію лазерних коаксіальних головок для прямого осадження металевго порошку за методом DED (Direct Energy Deposition) та док-систему. Система дозволяє практично на будь-якій машині з ЧПК виконувати адитивні операції разом з фрезерними, токарними, шліфувальними та іншими в одній установці. Кожна головка повністю сумісна із стандартним пристроєм зміни інструменту та будь-яким стандартним шпинделем верстату. Першою комерційною машиною, яка застосувала систему AMBIT, була машина HSTM 1000 HYBRID німецької фірми Hamuel Maschinenbau, що призначалася для відновлення пошкоджених лопатей авіаційних двигунів.

Перевагами гібридизації, у порівнянні з пост-обробкою, є:

- забезпечення більш жорстких допусків завдяки тому, що адитивний процес і механічна обробка відбуваються в одній і тій самій системі координат;

- можливість переходів між операціями АМ та SM в залежності від технології виготовлення деталі без її переустановлення;

- можливість підвищення продуктивності АМ за рахунок збільшення товщини кожного нанесеного шару і, відповідно, зменшення точ-

ності розмірів, яка врешті рещт забезпечується вже SM процесами;

- можливість виготовлення різних частин деталі з різних матеріалів, що утруднено навіть в адитивному процесі; скорочення матеріальних витрат за рахунок виконання невідповідальної частини деталі з дешевшого матеріалу, або нанесення на деталі зі звичайного сплаву високоякісного покриття з метою підвищення її довговічності;

- забезпечення ремонту (відновлення) деталей на одній платформі шляхом видалення пошкоджених ділянок, сканування деталей з метою порівняння з їх цифровими моделями і подальшим осадженням металевго порошку та чистою обробкою;

- виконання на одній машині обох процесів замість придбання двох окремих систем.

Світовими лідерами у верстатобудівній промисловості з гібридними пропозиціями є: DMG Mori – німецько-японська компанія; Matsuura, Mazak, Sodick – японські компанії; ELB-Schliff – німецька компанія; Mitsui Seiki, Optomec, Fabrisonic – американські компанії; Okuma – американський підрозділ японської компанії.

Основними адитивними методами, які використовуються у гібридному адитивному обладнанні, є пряме осадження енергії (DED) та плавлення у порошковому шарі (PBF). За методом DED найрозповсюдженішою є технологія DMD (Direct Metal Deposition – пряме осадження металу) та аналогічні їй – технології LENS (laser Engineered Net Shaping), LMD (laser Metal Deposition). Найважливіше призначення цих технологій – ремонт дорогих деталей, таких, наприклад, як лопаті турбін.

За більшістю технологій DED друк здійснюється коаксіальною лазерною головкою з сфокусованим лазерним променем, що утворює басейн розплаву на цільовій ділянці деталі, в яку подається металевий порошок, захищений шаром інертного газу для захисту металу від кисню (рис. 1).

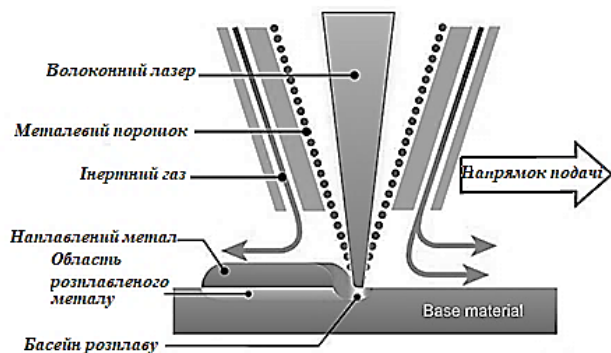


Рис. 1. Принцип функціонування коаксіальної лазерної головки для нанесення металу [10]

Друкуюча головка рухається по 3 або 5 осях, крім того, сама деталь знаходиться на поворотній платформі, що дає можливість металу осідати точно, під різними кутами для отримання складної геометрії за допомогою програмного забезпечення DMDCAM, яке генерує шляхи осадження порошку. Високошвидкісні датчики системи зворотного зв'язку збирають інформацію про пул розплаву, що безпосередньо надходить у спеціальний контролер, який регулює вхідні дані процесу, такі як потужність лазера для підтримки розмірів деталей.

Основною технологією за методом PBF є SLM (Selective laser melting – селективне лазерне плавлення), за якою відбувається розплавлення металевого порошку в попередньо сформованому шарі. У гібридному виробництві вона так широко не застосовується, оскільки, як вже було сказано, її продуктивність на порядок менша за технології DED. Але першою у світі гібридною адитивною машиною, випущеною у 2002 році, була машина Matsuura LUMEX Avance-25, компанії Matsuura, яка застосувала саме SLM. Найновішою з серії машин компанії є система LUMEX Avance-60 (рис. 2). Максимальний розмір виробу – $Ш600 \text{ мм} \times Г600 \text{ мм} \times В500 \text{ мм}$; максимальна робоча вага – 1300 кг.

Ця гібридна технологія особливо вигідна для виготовлення прес-форм та штампів, оскільки виробничі витрати на їх виготовлення знижуються удвічі порівняно зі звичайними методами.

Компанією DMG Mori випускається серія машин для гібридного адитивного виробництва на основі технології лазерного осадження металу (LMD). Лазерна головка є власною розробкою

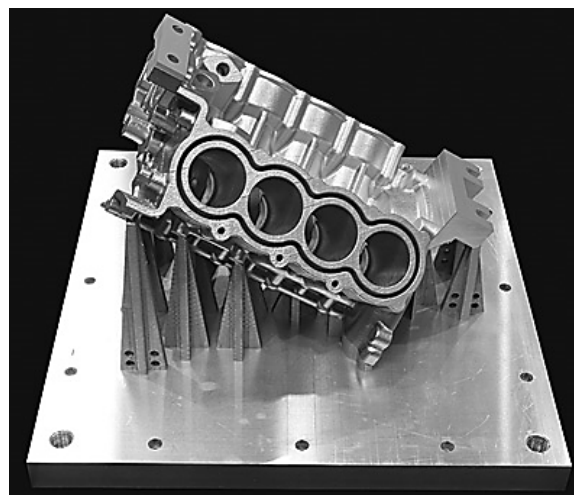
компанії. У машинах застосовується програмне забезпечення Siemens NX: Complete Hybrid CAD/CAM – модуль для адитивного та субтрактивного програмування, а також CELOS DMG Mori – система контролю процесу нарощування лазером та автоматичного регулювання потужності лазера в режимі реального часу. Машини DMG Mori призначені для виготовлення широкої номенклатури виробів, навіть дуже великих розмірів, та ремонтних робіт. Наприклад, на машині LASERTEC 6600 DED Hybrid, представленої на рис. 3, виготовляються деталі ракетних двигунів, труби для нафтових свердловин для енергетичної промисловості, вали для транспортних літаків та ін. Деякі характеристики гібридних машин компанії DMG Mori наведені у табл. 1.

Компанією Mazak розроблено декілька гібридних машин. Першою у 2014 році була розроблена машина INTEGRIX i-400AM на базі багатозадачного 5-осевого токарно-фрезерного центру INTEGRIX (рис. 4) з двома типами лазерних головок LMD: високоточної головки (Fine LMD), призначеної для більш тонкої подачі порошку (товщина шару 0,5-1,0мм), та високошвидкісної головки (High Speed LMD) зі швидкістю осадження 1кг/год (товщина шару 1,0-3,0 мм). При виборі технології LMD її суттєвою перевагою була відзначена можливість комбінування різноманітних металів та сплавів, а не створення 3D-об'єктів.

Ілюстрація гібридного процесу на машині INTEGRIX i-400AM представлена на рис. 5. Заготовкою є труба, виготовлена з нержавіючої сталі 316S31, на якій розміщуються елементи з металевого порошку (сплав на основі нікелю Inconel 718),



а)



б)

Рис. 2. Машина LUMEX Avance-60 компанії Matsuura та зразок виробу [14]
а) машина LUMEX Avance-60; б) блок циліндрів двигуна (розміри $Ш424 \times Г317 \times В339 \text{ мм}$; матеріал – алюміній AlSi10Mg; час циклу – 95 годин (спікання 90год, фрезерування 5 год.))



Рис. 3. Машина LASERTEC 6600 DED Hybrid компанії DMG Mori



Рис. 4. Машина INTEGREX i-400AM [16]

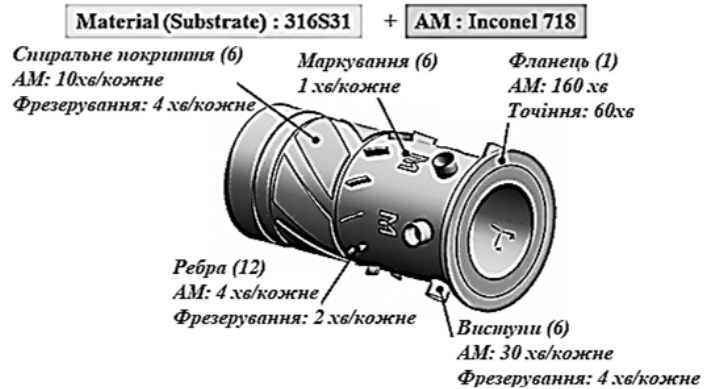


Рис. 5. Ілюстрація гібридного процесу та загального часу його циклу [16]

Таблиця 1

Характеристики машин DMG Mori [15]

Модель машини, рік випуску	Розміри по осях X;Y;Z, мм	Максимальна маса заготовки, кг	Найбільший розмір заготовки, мм	Тип верстата з ЧПУ
LASERTEC 65 DED Hybrid (2014р.)	750×650×560	600	Ø600	5-осевий вертикально-фрезерний центр
LASERTEC 125 DED Hybrid (2019р.)	1335×1250×900	2000	1251×1250×745	5-осевий вертикально-фрезерний центр
LASERTEC 4300 DED Hybrid (2020р.)	660×660×1500	1700	660×660×1500	5-осевий токарно-фрезерний центр
LASERTEC 6600 DED Hybrid (2021р.)	1400×330×3890	7000	Ø1010×3702	5-осевий токарно-фрезерний центр

стійкого до корозії, окислення, повзучості та високих температур.

Розробники процесу провели випробування зразків на механічну міцність та визначили мікро-

структуру перехідної ділянки між матеріалом підкладки (сплав 316S31) та осадженим матеріалом (Inconel 718). Результати свідчать про те, що міцність ділянки, отриманої осадженням сплаву

Inconel 718, майже еквівалентна гарячекатаному сплаву Inconel 718. Розрив зразка відбувається на стороні сплаву 316S31, а по мікроструктурі Inconel718 матеріал нанесений щільно, і ніяких дефектів не спостерігається.

На базі 5-осевого токарно-фрезерного центру INTEGREX були випущені ще такі машини: INTEGREX i-200S AM (2016р.); INTEGREX i-300S AM (2017р.); INTEGREX i-400S AM (всі – з двома токарними шпинделями), а також машини на базі вертикально-фрезерного центру: VC-500 AM (2016р.), яка була уперше оснащена системою головок AMBIT компанії Hybrid Manufacturing Technologies, VC-500A/5X AM HWD та VARIAXIS j-600AM.

В VC-500A/5X AM HWD застосована інноваційна адитивна технологія наплавлення гарячим дротом (HWD, Hot Wire Deposition), розроблена Mazak у співпраці з компанією Lincoln Electric. На відміну від звичайного зварювання, головка HWD використовує як дугову горілку, так і лазер для точного розплавлення металевго дроту безпосе-

редньо на матеріалі основи та/або деталі зі швидкістю від 1,36 до 1,8 кг/год (деякі характеристики машин – див. табл. 2).

У машині VARIAXIS j-600AM застосовується стандартна дугова головка Wire-Arc AM (WAAM – адитивне виробництво методом дугового зварювання) для зварювання дротом. Завдяки використанню у якості матеріалу металевго дроту продуктивність процесу значно вище, ніж при використанні порошку.

З 2014 року німецька компанія ELB-Schliff почала випускати шліфувальні гібридні адитивні машини MillGrind. На машині, представленої на рис. 6, крім шліфування, виконуються свердління, фрезерування та лазерне осадження порошку з використанням системи AMBIT. В машині застосовуються шліфувальні круги із звичайних абразивних матеріалів. Шліфування забезпечує точність обробки (роздільна здатність по осях XYZ – 0,1мкм), і є особливо ефективним для важко оброблюваних сплавів, таких, як суперсплави на основі нікелю.

Таблиця 2

Характеристики деяких машин компанії Mazak [17]

Модель машини	Розміри по осях X;Y;Z,W, мм	Найбільший розмір заготовки, мм	Тип верстата з ЧПУ
INTEGREX i-400 AM	525×206×1077×726	Ø500×1011	5-осевий токарно-фрезерний центр
INTEGREX i-400S AM	615×730(X2)×260×1585×1423(Z2)×1574	Ø658×1519	
VC-500 AM	505×505×510	Ø600×306	5-осевий вертикально-фрезерний центр
VC-500A/5X AM HWD	555×505×510	Ø600×306	
VARIAXIS j-600AM	860×560×610	Ø730×460	



Рис. 6. Шліфувальна гібридна машина з серії MillGrind [18]

Таблиця 3
Технічні характеристики машини
MillGrind [18]

Ширина шліфування – 700 мм	Відстань від центру шпинделя до стола – 900 мм
Довжина шліфування – 1000 мм	Максимальні розміри шліфувального круга – 300×65 мм
Робочі розміри заготовки: 400×400×350мм [L×W×H]	

Висновки. Зазначено, що в останні роки гібридне адитивне виробництво стрімко розвивається. В процесі проведених досліджень відзначено його переваги у порівнянні з адитивним виробництвом, що передбачає подальшу пост-обробку. Проведена порівняльна характеристика основних адитивних технологій,

використовуваних у сучасних гібридних адитивних машинах і визначено, що технології за методом DED мають ширше застосування у порівнянні з технологіями PBF за рахунок на порядок більшої їх продуктивності. Найважливіше призначення технологій за методом DED – це ремонт дорогих деталей, таких, наприклад, як лопаті турбін. Розглянуто технічні характеристики гібридних адитивних машин та надано рекомендації щодо їх вибору в залежності від типу оброблюваних деталей. Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть допомогти підприємствам переосмислити роль інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності, оцінити їх переваги і ретельніше підходити до придбання гібридного адитивного обладнання, щоб робити правильний вибір.

Список літератури:

1. Tyrrell M. Mitsui Seiki launches hybrid 3D additive and machining centre. URL: <https://www.aero-mag.com/mitsui-seiki-hybrid-3d-additive-vertical-machining-centre-2d-cnc/> (дата звернення 11.08.2016).
2. Писаренко Т.В., Кваша Т.К., Рожкова Л.В., Коваленко О.В. Інноваційна діяльність в Україні у 2019 році: науково-аналітична доповідь. К.: УкрІНТЕІ, 2020. – 45 с.
3. Українське держпідприємство друкуватиме деталі для ракет на 3D-принтері. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2019/05/13/647722/> (дата звернення 13.05.2019).
4. ДП «Антонов» використовує адитивні технології для зниження витрат та поліпшення характеристик (відео) URL: <https://uprom.info/news/avia/dp-antonov-vykorystovuye-adytyvni-tehnologiyi-dlya-znyzhennya-vytrat-ta-polipshennya-harakterystyk-video/> (дата звернення 19.08.2019).
5. Шаповалов В.О. Наукові основи дугових адитивних технологій у спецефекторметалургії та електрозварюванні. *Вісник НАН України*. 2018. № 7. С.33-39.
6. Науковці Академії розробили нове обладнання для виробництва комплектуючих до турбін та авіадвигунів. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8027&fbclid=IwAR118vkhOLB79VhQ-j5aeJvdBIsZMjGuqZU-3IVYECzTcGtJ5BBMgONaYcG> (дата звернення 16.07.2021).
7. Twi orders new electron beam system from Chervona hvilya. URL: <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2019/twi-orders-new-electron-beam-system-from-chervona-hvilya> (дата звернення 21.05.2019).
8. Рубах М. Зворотній інжиніринг і адитивне виробництво. Світовий тренд імпортозаміщення та локалізації для забезпечення сталого розвитку. *Баланс Енергетики України*. 2018. №1(01). С. 24-26.
9. Неежмаков П.И., Скляр В.В., Прокопов А.В. Анализ возможностей национальных эталонов Украины для обеспечения прослеживаемости измерений в сфере аддитивного производства. *Український метрологічний журнал*. 2018. №1. С. 22-29.
10. Jones B. J. Repurposing mainstream CNC machine tools for laser-based additive manufacturing: SPIE Conference proceedings, Vol. 9738. *Laser 3D Manufacturing III* (San Francisco, 13-18 february 2016). San Francisco, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2217901>.
11. Wit Grzesik. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review. *Journal of Machine Engineering*. 2018. Vol.18, 4. С.5-24. DOI:10.5604/01.3001.0012.7629.
12. Davide Sher. 10 top hybrid manufacturing companies. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/the-top-ten-hybrid-manufacturing-companies/> (дата звернення 1.03.2019).
13. Global Hybrid Additive Manufacturing Machines Sales Market Report 2021. URL: <https://www.24marketreports.com/manufacturing-and-construction/global-hybrid-additive-manufacturing-machines-2021-660> (дата звернення 28.05.2021).
14. LUMEX Avance-60. URL: <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-60>
15. DMG Mori LASERTEC 6600 3D. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/dmg-mori-lasertec-6600-3d/>.
16. Taku Yamazaki. Development of a Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining: *Procedia CIRP* 42:81-86. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). DOI:10.1016/j.procir.2016.02.193.
17. Mazak. URL: <https://www.mazakusa.com/machines/>.
18. ELB-Schliff millGrind overview. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/elb-schliff-millgrind/>

Habovda O.V. ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF HYBRID ADDITIVE PRODUCTION AND PROSPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN UKRAINE

The article discusses the advantages of hybrid additive manufacturing, reviews modern hybrid additive machines of the world's leading companies, provides a comparative analysis of their technical characteristics and additive technologies on the basis of which they are built, gives recommendations for products that are more appropriate to manufacture on these machines. The relevance of the article is due to the continuous development of hybrid additive systems, which combine additive and subtractive processes at one production platform which usually includes a multi-axis machining center and laser coaxial heads, for direct deposition of metal powder or wire, depending on the additive technology used.

The system enables almost any CNC machine to perform additive operations in sync with milling, turning, grinding and others in one installation, when cutting tools and laser heads are located in one tool set and supplied from it in accordance with the sequence of the technological process of processing parts, thanks to machines' equipping with integrated programming systems. The experience of Ukrainian enterprises, which have a lot of outdated equipment, in operations with additive technologies is quite limited, especially when it comes to the implementation of hybrid additive processes. The article describes the achievements of Ukrainian companies that develop new original additive technologies and equipment. In a state of war, the situation at production in Ukraine is deteriorating.

But in the future, a radical transformation of Ukrainian production is inevitable. The aim of study is a comparative analysis into technical characteristics and technologies of the latest hybrid additive machines which might be a basis for a more efficient approach of enterprise to the implementation of a hybrid additive manufacturing, double-checking the role of innovations and technologies in their competitiveness.

Key words: *hybridization, additive technologies, subtractive processes, hybrid additive machines, innovations, competitiveness.*



МУКАЧІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

89600, м. Мукачево, вул. Ужгородська, 26

тел./факс +380-3131-21109

Веб-сайт університету: www.msu.edu.ua

E-mail: info@msu.edu.ua, pr@mail.msu.edu.ua

Веб-сайт Інституційного репозитарію Наукової бібліотеки МДУ: <http://dspace.msu.edu.ua:8080>

Веб-сайт Наукової бібліотеки МДУ: <http://msu.edu.ua/library/>