

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-9-22

УДК 678.05

*Олексій Солнцев<sup>1</sup>, Сергій Сапон<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> аспірант кафедри конструювання машин, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [solntsevalex315@gmail.com](mailto:solntsevalex315@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3645-236X>

ResearcherID: ITU-5210-2023

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.

ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

## ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

*В роботі проведено аналіз існуючих розробок і досліджень гібридних технологій формоутворення поверхонь, які поєднують 3D-друк з постобробкою. Потенціал гібридних технологій формоутворення полягає у створенні деталей зі складною просторовою геометрією та покращеною якістю і точністю виконавчих і базових поверхонь. Більш детально сконцентровано увагу на реалізації гібридних технологій на обладнанні з паралельною кінематикою. Виявлено проблематику, невирішені задачі та сформульовано перспективи подальших досліджень. Представлена в статті інформація має оглядовий характер.*

**Ключові слова:** гібридні технології формоутворення, адитивні технології, обладнання з паралельною кінематикою, полімерні матеріали.

*Рис.: 11. Бібл.: 17.*

**Актуальність теми дослідження.** Гібридні технології формоутворення на основі полімерів (Hybrid polymer-based manufacturing technology) викликали значний інтерес в останні роки завдяки їх потенціалу до виробництва деталей зі складною геометрією та функціональними характеристиками, яких неможливо досягти традиційними методами виробництва. Одним з різновидів гібридних технологій формоутворення є поєднання на одному обладнанні процесів адитивного виробництва (Additive Manufacturing) і субтрактивного виробництва (Subtractive Manufacturing) для виготовлення кінцевої деталі. Огляду саме таких технологій присвячена дана стаття.

На відміну від класичних методів 3D-друку, гібридні технології формоутворення на основі полімерів дозволяють використовувати традиційні конструкційні матеріали, що використовуються в технологіях масового виробництва, наприклад термопласти, а не їх аналоги (фотополімери, порошкові полімери), що значно розширює застосування технології. Але у класичних екструзійних методах 3D-друку із застосуванням термопластів суттєвою проблемою є якість та точність поверхонь виробів. В гібридних технологіях формоутворення основною функцією адитивного процесу (3D-друк) є створення конструкцій з просторово-складним геометричним профілем з необхідною точністю і мінімальною матеріаломісткістю. А функцією субтрактивного процесу, яким є механічна обробка з ЧПУ, є забезпечення кінцевої геометричної точності та якості поверхні виробів. Таким чином, гібридне виробництво створює можливості виготовлення деталей зі складною просторовою геометрією, але з покращеною якістю і точністю виконавчих поверхонь, основних і допоміжних баз. [1, 2]

Гібридні технології формоутворення на основі полімерів мають значний потенціал у низці специфічних сфер застосування та індустріальних секторів і тісно пов'язані з напрямками Індустрії 4.0. [3] (таблиця 1)

Таблиця 1 – Індустріальні сектори та приклади застосування гібридних технологій

Індустріальний сектор	Застосування гібридних технологій формоутворення
Робототехніка та автоматизація	Виробництво компонентів для робототехніки та систем автоматизації, таких як захвати, датчики та системи керування. Поєднання адитивних і субтрактивних процесів дозволяє виготовляти деталі з інтегрованими функціями, такими як різбові вставки або електричні контакти, які можуть спростити складання та підвищити продуктивність системи. Виготовлення інструментів та устаткування для автоматизації процесу складання вузлів.
Виробництво верстатів та машин	Виготовлення компонентів верстатів та машин зі складною геометрією поверхонь. Виготовлення спеціальних затискачів складної форми для верстатних пристроїв.
Аерокосмічна промисловість	Виготовлення складних, точних, полегшених деталей за допомогою топологічної оптимізації на етапі проектування та використання можливостей адитивного виробництва для виготовлення деталей з частковим заповненням внутрішньої структури.
Медична галузь	Виготовлення імплантів та протезів з високою точністю та мінімальною шорсткістю складних поверхонь.

Джерело: розроблено авторами.

Загалом використання гібридних технологій формоутворення має наступні переваги:

- підвищення ефективності за рахунок зменшення кількості технологічних операцій, необхідних для виготовлення деталі, кількості одиниць обладнання та необхідних людських ресурсів для обслуговування цього обладнання, що сумарно призводить до скорочення часу виготовлення та зниження витрат;

- підвищення геометричної точності та якості поверхонь деталей за рахунок поєднання на одній технологічній операції адитивних технологій для швидкого формоутворення та субтрактивних технологій для чистової обробки виконавчих та базових поверхонь деталі.

- виробництво деталей з кастомізованими функціями, які неможливо виготовити лише за допомогою традиційних методів виробництва.

**Постановка проблеми.** Впровадження гібридних технологій формоутворення деталей з полімерних матеріалів має низку проблемних моментів. Перш за все це проблематика обладнання для гібридного формоутворення поверхонь з полімерних матеріалів. Класичне обладнання адитивного виробництва із застосуванням полімерів - 3D принтери для екструзійного друку - не мають достатньої жорсткості для реалізації субтрактивних процесів з високими показниками точності та якості оброблених поверхонь. Відомі рішення з інтеграції адитивних та субтрактивних процесів на металообробних верстатах з ЧПУ [4,5]. Однак, через високу вартість подібного обладнання такі рішення не можна вважати широкодоступними технологіями для кінцевого виробника. А надлишкова жорсткість такого обладнання, закладена для чорнкової обробки металів, не потрібна для постобробки полімерів.

Процеси механічної обробки полімерів є недостатньо дослідженою темою в порівнянні з процесами механічної обробки металів. Крім того значний ступінь невизначеності додають анізотропність та складнопередбачувані дефекти деталей формоутворених технологіями 3D-друку. Тому існує проблема фізико-механічних особливостей процесів постобробки полімерних виробів утворених адитивним способом. Вирішення цієї проблеми потребує додаткових досліджень, як теоретичних так і експериментальних.

Проблема програмного забезпечення. На сьогоднішній день генерація керуючої програми для адитивного та субтрактивного виробництва значно відрізняються. Тому задача управління процесом гібридного формоутворення для підвищення точності деталей за

рахунок постобробки є актуальною. Адитивне виробництво допускає роботу з stl-файлами (сіточними форматами) а утворення формоутворюючих рухів здійснюється виключно по прямим траєкторіям, які лінійно апроксимують необхідний контур.

Ще однією проблемою гібридних технологій формоутворення є необхідність інтеграції кількох різних технологічних процесів, що створює бар'єри зі сторони апаратного забезпечення, програмного забезпечення та інтеграції систем керування.

Часто гібридні технології формоутворення передбачають використання різних матеріалів, що може створити труднощі під час постобробки деталей з різнорідних матеріалів. Особливою проблемою є необхідність у адаптивних системах, які б враховували анізотропічність матеріалу при обробці таких деталей шляхом коригування режимів обробки з максимальною швидкістю. До цього слід додати необхідність забезпечення сумісності матеріалів і адгезії, особливо при поєднанні різних типів термопластів.

**Метою статті** є огляд існуючих сучасних розробок і впровадження обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з матеріалів на основі полімерів для виявлення, систематизації проблематики і невирішених задач та формулювання перспектив подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день сформоване певне розуміння терміну «гібридні технології», яке за думкою авторів суперечить суті цього поняття. Сьогодні у більшості відкритих джерел поняття гібридних виробничих технологій вводиться виключно через поєднання підходів до формоутворення деталей, тобто гібридні технології пояснюються виключно через поєднання адитивних та субтрактивних технологій. [1, 2] Також у більшості досліджень гібридні технології згадуються виключно у застосуванні до виробництва деталей з металу. Це пояснюється перш за все тим, що основними лідерами у виробництві гібридного обладнання є великі виробники верстатів з ЧПК, які з ростом популярності адитивних технологій почали інтегрувати модулі для 3D друку у свої верстати та системи. [3, 4, 5]

Автори пропонують розглядати гібридні технології не тільки у контексті поєднання підходів до формоутворення, а саме через поєднання різних типів технологій на одному устаткуванні. Наприклад, обладнання, що може комбінувати екструзійний друк термопластами з литтям багатокomпонентних поліуретанів, як іншою технологією теж можна вважати гібридною технологією. Хоча основна проблема гібридного технологічного обладнання розкривається саме при поєднанні адитивних та субтрактивних технологій, про що було сказано вище.

Матеріали, представлені далі в статті, викладені відповідно до мети роботи за наступною структурно-логічною послідовністю (схемою):

- 1) Аналіз існуючих розробок та досліджень обладнання для гібридних технологій формоутворення.
- 2) Виявлення проблематики і невирішених задач.
- 3) Формулювання перспектив подальших досліджень.

**Аналіз існуючих розробок та досліджень** обладнання для гібридних технологій формоутворення.

Як вже було зазначено, аналіз проведених досліджень показує, що гібридні технології пояснюються та досліджуються виключно через поєднання адитивних та субтрактивних технологій, не враховуючи можливості комбінування інших технологій. Також більшість досліджень розглядає гібридні технології виключно у розрізі застосування до металів. Це й визначає актуальність даного дослідження, через великий запит на полімерні та композитні деталі з одного боку, та недослідженість теми гібридних технологій формоутворення виробів з матеріалів на основі полімерів з іншої.

Cortina, M. [6] у своїй роботі наводить один з прикладів поєднання технології селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering) та постобробки надрукованих металічних деталей різанням. Виробник високошвидкісних обробних центрів Matsuura з 2003 року розробляє гібридні фрезерні верстати для лазерного спікання металу під назвою LUMEX [7]. Ця серія складається з двох різних гібридних 3Д-принтерів, які відрізняються розміром робочої зони, Lumex Avance 25 і Lumex Avance 60. В обох моделях встановлено ітербієвий волоконний лазер, а операція фрезерування виконується за замовчуванням після обробки кожних 10 шарів, як показано на рис. 1.

Однозначним недоліком системи є наявність порошку, що змішується з стружкою під час обробки та заважає спіканню після обробки.

Аналогічний принцип селективного лазерного спікання використовується і до порошків на основі полімерів.

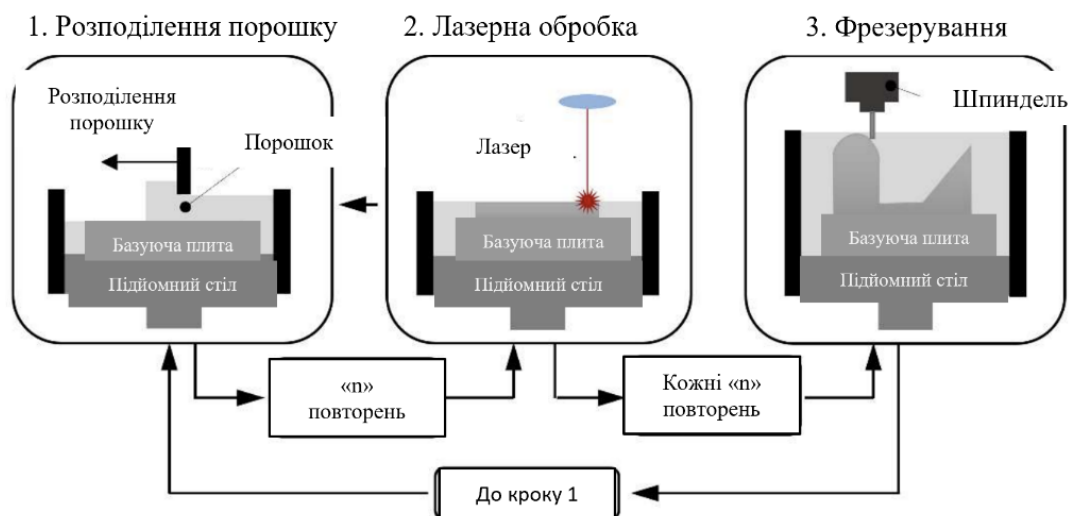


Рис.1 Схематичне зображення процесу гібридного виробництва деталей з металу за технологією селективного лазерного спікання [6]

У статі розглянуті також найпопулярніші кінематичні схеми (рис. 2), що використовуються у обладнанні для гібридних технологій формоутворення на основі селективного лазерного спікання. Жоден з наведених варіантів не використовує механізми паралельної структури.

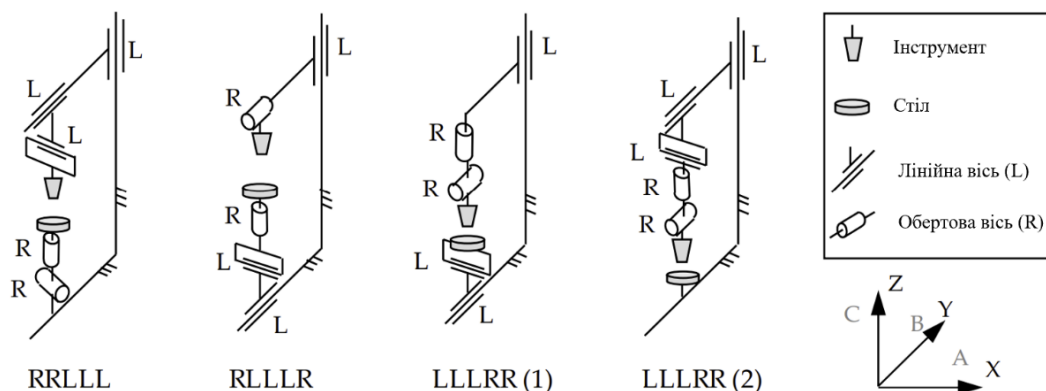


Рис. 2 Види найбільш популярних кінематичних ланок, що використовуються в конструкціях обладнання для гібридних технологій формоутворення [6]

Cortina, M. у своїй праці з посиланням на Flynn та ін. [8] також розглядає та систематизує виклики та бар'єри, характерні для обладнання для гібридних технологій формоутворення. (рис. 3). Не дивлячись на те що стаття орієнтована на гібридне виробництво деталей з металів та застосування селективного лазерного спікання металічних порошоків, розглянуті виклики (складність поєднання різних технологічних процесів на одному технологічному обладнанні) є актуальними і для гібридних процесів пов'язаних з виробництвом деталей на основі полімерів.



Рис. 3 Виклики до обладнання для гібридних технологій формоутворення [6]

У статті Лі та ін. [9] пропонується огляд 6-осового гібридного адитивно-субтрактивного процесу виробництва з використанням роботизованої руки з шістьма ступенями вільності у поєднанні із платформою для виготовлення деталей (рис. 4). Гібридний процес формоутворення реалізовано за допомогою роботизованої руки з шістьма ступенями вільності, оснащеної кількома змінними інструментами та інтегрованою виробничою платформою. Автори зазначають, що отримані результати дослідження гібридного адитивно-субтрактивного процесу показали, що гібридні технології формоутворення мають значний потенціал для скорочення часу виробництва, виготовлення деталей з кращою якістю поверхні. Основною перевагою використання роботизованої руки, як системи переміщення, є можливість утворення якісної поверхні довільної форми завдяки динамічному регулюванню напрямку осі інструменту та усунення потреби в друці підтримуючого матеріалу.



Рис. 4 Компоненти гібридного адитивно-субтрактивного виробничого процесу [9]: а – роботизована рука, б – змінні головки, в – платформа

У статті [10] X. Song та інші автори концентрують увагу на проблематиці поєднання адитивного та субтрактивного виробництва з точки зору обмеженості більшості існуючих компонентів для гібридного та адитивного виробництва 3-ма осями. Більшість процесів адитивного

виробництва є пошаровими з трьома лінійними рухами по осях X, Y і Z. Однак існують недоліки, пов'язані з такими обмеженими рухами. Наприклад неконформні властивості матеріалу, ефект сходів і обмеження на нарощування навколо вставок. Щоб уможливити 6-осьові переміщення між інструментом і заготовкою, автори досліджують механізм Стюарта (рис. 5) та розробили недорогий прототип системи для адитивних та субтрактивних виробничих процесів, таких як моделювання наплавлення і постобробка з ЧПУ.

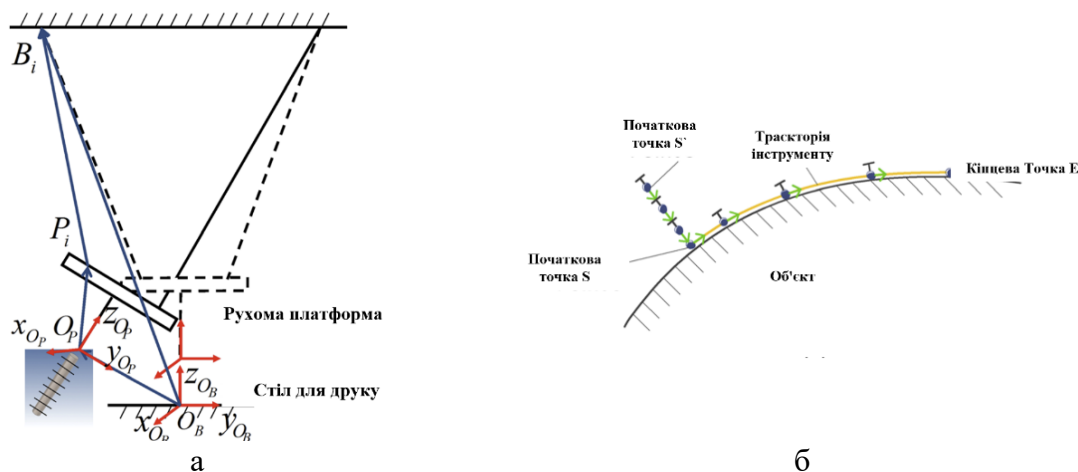


Рис. 5 Ілюстрація системи координат (а) і головних параметрів проходження нелінійного контуру (б) прототипу гібридної системи на основі механізму платформи Стюарта. [10]

В роботі обговорюються технічні проблеми при розробці такої системи, включаючи проектування апаратного забезпечення, планування та моделювання руху, перевірку обмежень платформи, моделювання руху інструменту та калібрування платформи.

У статті М. Milutinović та інші автори описують гібридну виробничу систему на основі паралельної кінематики, але концентрують увагу виключно на кінематичному аналізі та аналізі робочого простору системи, не описуючи переваги або недоліки використання такої системи у гібридних процесах формоутворення (рис. 6). [11]

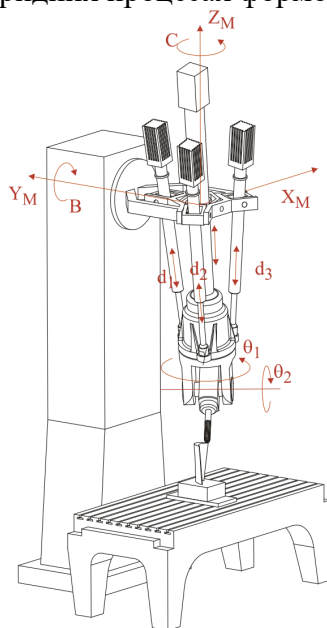


Рис. 6. Обладнання для гібридних процесів формоутворення на основі Tricept кінематики [11]

Нижче представлено аналіз існуючих видів обладнання, на яких можлива реалізація гібридних технологій формоутворення деталей з полімерних матеріалів.

Мультифункціональний 3D принтер Namma Eva Hybrid 3D (рис. 7) є системою гібридного виробництва, яка поєднує технології адитивного та субтрактивного виробництва. Об'єм виробів обмежений розмірами робочої зони (мм) 500 x 500 x 500. В Namma Eva Hybrid 3D передбачена реалізація 3-х технологій формоутворення: 3D-друк, механічна обробка різанням, лазерна обробка. В даному типі обладнання передбачена тільки можливість ручної заміни інструментів (декілька видів модулів для 3D-друку, шпинделі різної потужності, лазерні різакі) [12].

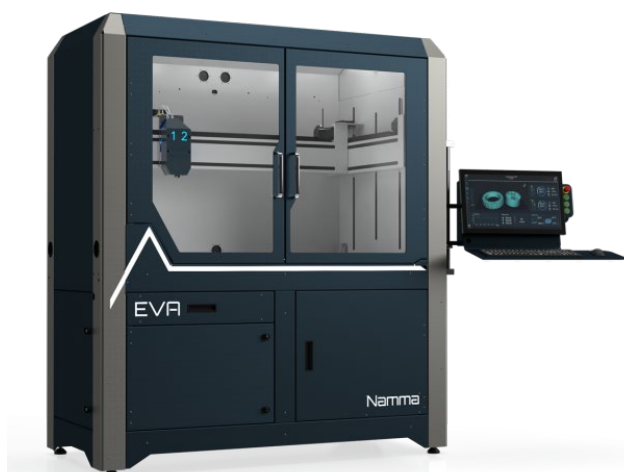


Рис. 6. Гібридний, мультифункціональний 3D принтер Namma Eva Hybrid 3D (Франція) [12]

Відсутність у Namma Eva Hybrid 3D можливості автоматизованої заміни інструменту не дозволяє максимально ефективно комбінувати різні технології в межах однієї технологічної операції.

Diabase H-Series 3D printer (рис. 8) - це система гібридного виробництва, побудована на основі багатокординатного верстата з ЧПК. Основною особливістю цього обладнання є система заміни інструмента на основі револьверної головки та багатокординатна пост-обробка та друк виробів [4].

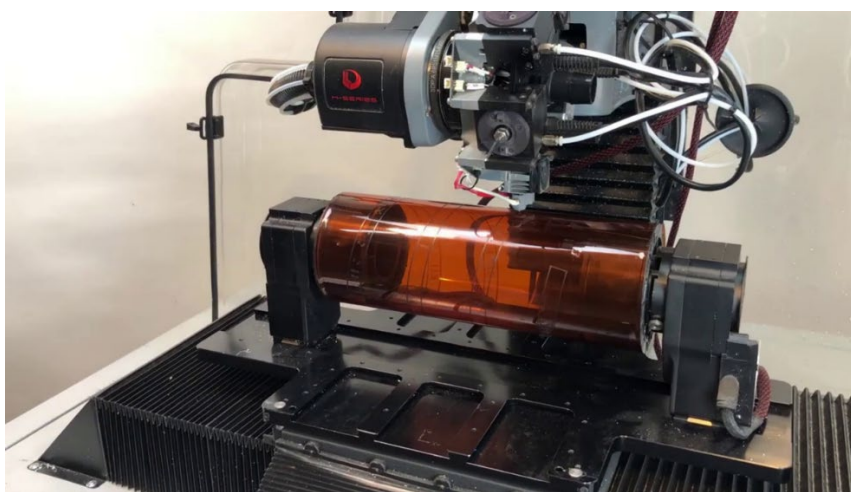


Рис. 7 Система гібридного виробництва Diabase H-Series (США) [4]

4D Pioneers 4Shift (рис. 9) - 3D-принтер на основі роботизованої системи з можливістю автоматичної заміни модулів друку, який здатний працювати з різними матеріалами на основі полімерів, включаючи силікон та композитні полімери [13]. Використання роботизованої руки, як системи переміщення, не дозволяє досягати високих показників точності оброблених поверхонь при постобробці та не забезпечує високої продуктивності формоутворення поверхонь.

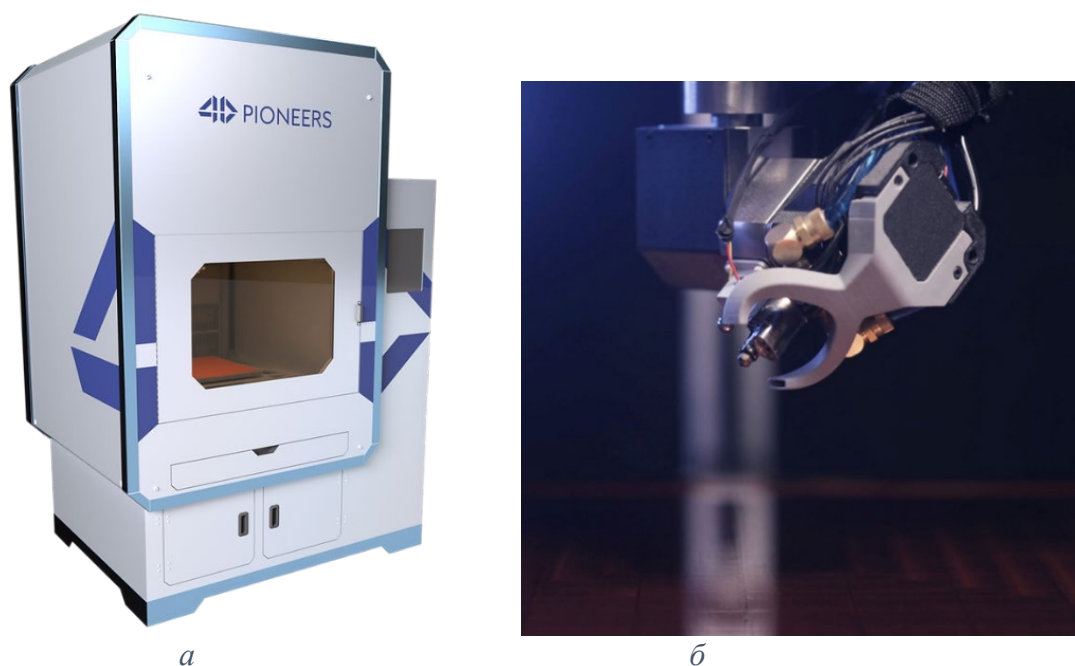
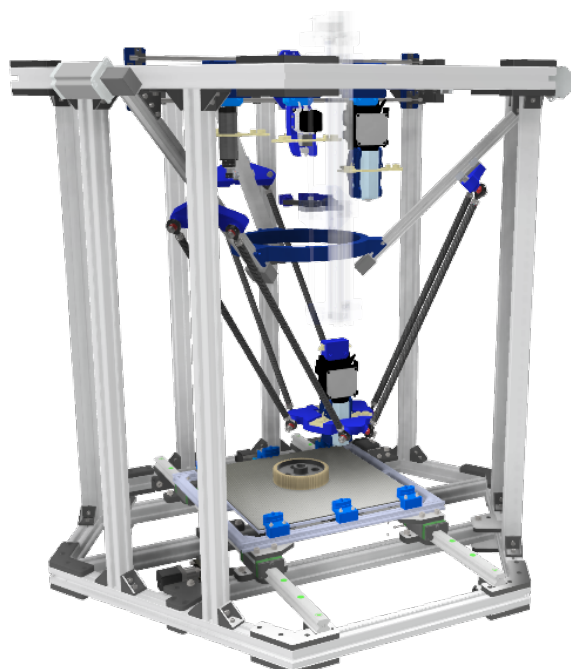


Рис. 8. 4D Pioneers, 4Shift 3D printer (Франція) [13]: а – загальний вид, б – роботизована рука з змінним модулем для 3D-друку.

На сьогодні випускниками Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та Університету прикладних наук м. Хоф засновано стартап SmartZavod. [14] В даному стартапі зацентровано увагу на створенні обладнання для гібридної технології формоутворення деталей з полімерних матеріалів, яке б відповідало запитам ринку та вирішувало основні проблеми, які описані в цій статті. Зокрема система має в основі систему переміщення з структурами паралельної кінематики, що дозволяє мати достатні динамічні характеристики для швидкого та продуктивного 3D-друку з однієї сторони та достатню жорсткість для механічної постробки виробів з іншої.

Гібридний принтер SmartZavod (рис. 10) має унікальну систему автоматизованої заміни інструмента для поєднання різних технологій формоутворення деталей на одній технологічній операції без втручання оператора. Така система створює можливості створення складних деталей з частою зміною формоутворюючих інструментів. Унікальність системи полягає в тому, що система дозволяє автоматичну зміну різних модулів за типом технології та розміром (модуль для екструзії термопластів різних діаметрів сопла від 0,2 мм до 2,5 мм, модулі для змішування і дозування компаундів та силіконів, модулі для постобробки) у комбінації з системою переміщення на основі паралельної кінематики.





*Рис. 9. Концепт повністю автоматизованого гібридного 3D принтера SmartZavod з автоматизованою системою зміни інструменту та системою очищення столу [14]*

Додатково для повної автоматизації процесу виробництва прототипів та кінцевих виробів була розроблена система автоматичного очищення столу та зняття надрукованих виробів. Система захищена двома патентами на корисну модель [15, 16].

Зокрема результати роботи над створенням системи SmartZavod пройшли впровадження в навчальний процес на кафедрі конструювання машин НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» та стали частиною навчального посібника [17].

В таблиці 2 наведено систематизоване порівняння характеристик існуючого на сьогодні обладнання для гібридних технологій формоутворення.

Аналіз існуючих рішень показує, що в сегменті доступного обладнання гібридних технологій формоутворення виробів для малих та середніх підприємств не виявлено великої кількості рішень. Знайдені рішення мають ті чи інші обмеження, що ускладнюють його використання для кінцевих користувачів

Зокрема Namma має відносно велику робочу зону та достатню для полімерних деталей точність постобробки. Але обрана кінематика обмежує використання лише за 3-ма осями. Відсутність автоматизованої зміни інструмента робить використання обладнання у застосуванні до виробництва складних виробів, де потрібна часта заміна інструменту протягом однієї технологічної операції, досить незручним для оператора або взагалі неможливим.

Рішення Diabase побудовано на основі верстата класичної компоновки з барабаном в якості системи зміни інструменту. Компоновка має достатню жорсткість для операцій постобробки. Компоновка модуля адитивного формоутворення не дає можливості використовувати термоактивну камеру, що значно обмежує кількість полімерів які можна застосувати.

Таблиця 2 – Порівняння характеристик обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів

Характеристики	Найменування обладнання			
	Smart Zavod	Namma Eva Hybrid 3D	Diabase H-Series 3D printer	4D Pioneers. 4Shift
Розміри робочої зони (мм)	450x450x450	1000x500x500	416x186x375	485x485x500
Точність позиціонування у трьох координатах (мм)	0,05	0,05	0,03	(немає даних)
Тип кінематики	Tripod. Паралельна кінематика	Cartexian XYZ.	Cartexian XYZ з поворотним столом	Роботизована рука на основі Cobots
Наявність автоматичної зміни виконавчого органу	+	-	+	+
Кількість технологій, що можуть бути реалізовані	5	3	2	3
Кількість осей, що використовується для формоутворення	3	3	5	5
Кількість інструментів	8	6	6	4
Швидкість адитивного формоутворення	300 мм/с	150 мм/с	150 мм/с	100 мм/с

Джерело: розроблено авторами.

Рішення 4D Pioneers побудовано на основі роботизованої руки та має системи зміни інструментів для 4 позицій. Роботизована рука та конструкція системи дає можливість зміни інструментів лише в обмеженому габариті. Тобто унеможливує зміну між інструментами наприклад для звичайного друку з соплом діаметром 0,4 мм та високопродуктивного друку більшими екструдерами. Також встановлення високошвидкісних шпинделів для постобробки або дозуючо-змішуючого обладнання є неможливим. Виробник не надає даних за точністю та максимальними швидкостями формоутворення, але враховуючи використання їм роботизованої руки, як системи переміщення можна зробити висновок про обмеження за цими параметрами.

Рішення SmartZavod враховує найважливіші виклики гібридного обладнання. Система зміни інструменту дозволяє оперувати з різними за типом та габаритами інструментами в автоматизованому циклі. Зокрема паралельна кінематика дозволяє працювати з високими швидкостями і прискореннями та має достатню жорсткість для постобробки полімерів за рахунок закритої кінематичної ланки та відсутності великих рухомих мас.

Також рішення є масштабованим під непланарний друк та обробку за більше ніж 3-ма осями. Основним недоліком рішення є складність механізмів паралельної структури та відсутність єдиного програмного забезпечення, яке давало б змогу ефективно та зручно використовувати різні технології та типи матеріалів на одній технологічній операції.

Аналіз наукових праць індексованих наукометричною базою Scopus за ключовими словами «Hybrid AND manufacturing» дозволяє оцінити кількість праць та динаміку росту досліджень в цій галузі з 2013 по 2022 рік.

Є однозначний тренд на збільшення досліджень у цій темі. Так кількість праць у 2020 році в два рази більше в порівнянні з 2014 (рис. 11, а). Лідируючими країнами є Китай, США, Німеччина (рис. 11, б).

З іншої сторони, глибший пошук показує, що кількість праць націлених на дослідження гібридних технологій формоутворення саме у застосуванні до полімерів є порівняно невеликою, що відкриває значні можливості для дослідження цієї теми. Пошук за ключовими словами, що включають «POLYMERS» дав усього 132 результати у

період з 2013 по 2022 роки, а детальний аналіз статей показав, що ці праці більше розглядають гібридність технологій з точки зору застосування різних композитних матеріалів.

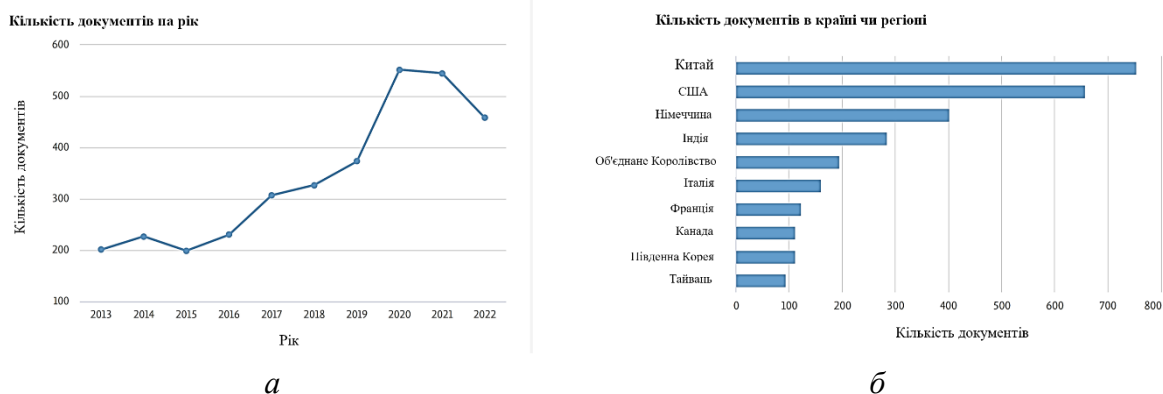


Рис. 10. Результати аналізу наукових праць індексованих наукометричною базою Scopus за ключовими словами «Hybrid AND manufacturing» за період з 2013 по 2022 роки: а - кількість праць по роках; б - кількість праць за країнами

**Висновки.** Таким чином можна виділити та систематизувати наступні проблеми обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів.

1. Технічно досконале обладнання для гібридного формоутворення деталей з полімерів створене на базі оброблювальних центрів з ЧПУ не є широкодоступним для кінцевого споживача – малих та середніх виробничих підприємств. Таке обладнання має надлишкову жорсткість, передбачену для чорнової обробки металів, яка не потрібна для постобробки деталей з полімерів. Це також впливає на енергоефективність, враховуючи велику кількість допоміжних рухів необхідних для адитивного формоутворення з однієї сторони та великі рухомі маси вузлів верстата з іншої.

2. Існуючі рішення в доступному сегменті мають певні суттєві обмеження. Зокрема при виготовленні складних виробів, де потрібна часта зміна інструменту, існує проблема автоматизованої зміни інструмента. Наразі це реалізовано здебільшого на основі роботизованих рук, які в свою чергу не можуть забезпечити достатньої швидкості обробки, мають обмеження за робочою зоною та жорсткістю у крайніх положеннях робочої зони.

3. Питання постобробки полімерів є недостатньо дослідженим. Зокрема це стосується обробки деталей з полімерів, які отримані адитивними технологіями та мають специфічну внутрішню структуру і анізотропічні властивості матеріалу.

#### Подальші напрямки роботи

Спираючись на аналіз існуючих рішень подальший напрямок роботи включає наступні питання:

1) аналіз доцільності використання рухомої системи на основі паралельної кінематики до гібридного обладнання для формоутворення деталей з полімерів з врахуванням визначеної проблематики та критеріїв до обладнання;

2) динамічний аналіз рухомої формоутворюючої системи з механізмами паралельної кінематики;

3) аналіз процесів механічної постобробки деталей з полімерів та композитів отриманих адитивним виробництвом;

4) експериментальне підтвердження ефективності та працездатності розробленої системи автоматизованої зміни інструменту на різних типах та габаритах інструменту; оцінка часу заміни інструменту, як одного з ключових параметрів ефективності роботи системи;

5) оцінка розробленого та побудованого прототипу обладнання для гібридного формоутворення на основі механізмів паралельної структури;

6) дослідне впровадження системи на виробничих підприємствах України та Німеччини;

Актуальність подальших досліджень та розробки гібридних технологій формоутворення виробів на основі полімерів підтверджена запитами з різних секторів промисловості, а також недостатньою дослідженістю визначеною за пошуками у базі Scopus. Використання паралельної кінематики в основі рухомої системи гібридного принтера підтверджено дослідженнями динаміки процесів постобробки полімерів, що буде викладено авторами у подальших статтях.

### Список використаних джерел

1. Grzesik, W. Hybrid Manufacturing Processes. Physical Fundamentals, Modelling and Rational Applications / W. Grzesik, A. Ruszaj. – Springer, UK. – 2021. – 234 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>.

2. Nagel, J. Hybrid Manufacturing System Design and Development // Manufacturing System. Edited by Dr. Faieza Abdul Aziz / J. Nagel, F. Liou. – 2012. – P. 223-246. DOI: <https://doi.org/10.5772/2234>.

3. Kuznietsov, Y. Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 / Y. Kuznietsov, O. Solntsev // Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2022. – Vol. 65. – Pp. 3-7.

4. Diabase Engineering [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.diabase-machines.com/>

5. CEAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ceadgroup.com/solutions/gantry-based-solutions/bead/>

6. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations / M. Cortina, J. Arrizubieta, J. Ruiz, E. Ukar, A. Lamikiz // Materials. – 2018. – Vol. 11(12). – 2583 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122583>

7. Lumex. Matsuura [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lumex-matsuura.com/english/>

8. Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools – Research and Industrial Developments / J. M. Flynn, A. Shokrani, S. T. Newman, V. Dhokia // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 101. – Pp. 79-101.

9. Li, L. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. / L. Li, A. Haghghi, Y. Yang // Journal Manuf. Process. – 2018. – 33. – Pp. 150–160.

10. Song, X. (2015). Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing / X. Song, Y. Pan, Y. Chen // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028897>.

11. Milutinović, M. Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool / M. Milutinović, N. Slavković, D. Milutinovic // FME Transactions. – 2013. – Vol. 41. – Pp. 1-10.

12. Namma. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://namma-france.com/en/eva/>

13. 4DPIONEERS corporation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.4dpi-oneers.com/4shift/>

14. SmartZavod [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.smartzavod.com/>

15. Автоматизована система відокремлення і видалення надрукованого зразку зі столу та очищення столу після друку на 3D-принтері : патент 153465 UA : B33Y10/00 / Солнцев О. В., Яхно А. С. – № u202204290, заявл. 14.11.2022, опубл. 12.07.2023, Бюл. № 28.

16. Автоматизований гібридний 3D-принтер : заявка № u202204302, 14.11.2022, B33Y30/00, на одержання патенту України на корисну модель / Солнцев О. В., Яхно А. С. – Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель № 6828/ЗУ/23 від 05.07.2023.

17. Кузнецов, Ю. М. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. Лабораторний практикум : навч. посіб. / Ю. М. Кузнецов. – Київ : НТУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 70 с.

### References

1. Grzesik, Wit & Ruszaj, Adam. (2021). Hybrid Manufacturing Processes, Physical Fundamentals, Modelling and Rational Applications. <http://doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>.
2. Nagel, Jacquelyn & Liou, Frank. (2012). Hybrid Manufacturing System Design and Development. <http://doi.org/10.5772/2234>.
3. Kuznietsov, Yu., Solntsev O. (2022). Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0. Journal of the Technical University of Gabrovo, 65, 1-6.
4. Diabase Engineering. (n.d.). <https://www.diasemachines.com/>.
5. CEAD. (n.d.). <https://ceadgroup.com/solutions/gantry-based-solutions/bead/>.
6. Cortina, M., Arrizubieta, J., Ruiz, J., Ukar, E., Lamikiz, A. (2018). Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. Materials, 11(12), 2583. <https://doi.org/10.3390/ma11122583>.
7. Lumex. Matsuura. (n.d.). <http://www.lumex-matsuura.com/english/>.
8. Flynn, J.M., Shokrani, A., Newman, S.T., Dhokia, V. (2016). Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools-Research and Industrial Developments. International journal Mach. Tools Manuf, 101, 79–101.
9. Li, L., Haghghi, A., Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. Journal Manuf. Process, 33, 150–160.
10. Song, X., Pan, Y., & Chen, Y. (2015). Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme, 137, 021005.
11. Milutinović, Milan & Slavković, Nikola & Milutinovic, Dragan. (2013). Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool. FME Transactions, 41, 1-10.
12. Namma. (n.d.). <https://namma-france.com/en/eva/>.
13. 4DPIONEERS corporation. (n.d.). <https://www.4dpioneers.com/4shift/>.
14. SmartZavod. (n.d.). <http://www.smartzavod.com/>.
15. Solntsev O. V., Yakhno A. S. (2023). Automated system for separating and removing the printed sample from the table and cleaning the table after printing on a 3D printer (Ukrainian patent for a utility model №153465 UA, B33Y10/00). Bulletin №28.
16. Solntsev O. V., Yakhno A. S. (2023). Automated hybrid 3D printer (Application № u202204302, 14.11.2022, B33Y30/00, for obtaining a patent of Ukraine for a utility model) Decision on the issuance of a declaratory patent for a utility model № 6828/ZU/23 of 05.07.2023.
17. Kuznietsov, Yu. (2022). Technological equipment with parallel kinematics. Laboratory Workshop. Kyiv: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Отримано 07.08.2023

UDC 678.05

**Oleksii Solntsev<sup>1</sup>, Serhii Sapon<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD Student, Department of machine design, National technical University of Ukraine “Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute”, Ukraine E-mail: [solntsevalex315@gmail.com](mailto:solntsevalex315@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3645-236X>  
ResearcherID: ITU-5210-2023

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.  
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

## EQUIPMENT FOR HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF POLYMER MATERIALS PARTS

*Hybrid polymer-based manufacturing technologies have significant potential in the production of components with complex geometries and functional characteristics that cannot be achieved by traditional methods, as well as in several specific applications and industrial sectors related to Industry 4.0: robotics and automation, medicine, aerospace, machine tools, and machinery. The use of hybrid manufacturing technologies, including additive and subtractive, increases production efficiency by reducing the amount of required human and technical resources; enables the production of customized parts that cannot be*

produced using traditional equipment, as well as parts with complex spatial geometry and improved quality and accuracy of the working and base surfaces.

Scientific research and analysis have shown that polymer processing requires further study. Additionally, the introduction of hybrid polymer-based manufacturing technologies has a number of problems: lack of a sufficient theoretical and experimental basis, insufficient accuracy of equipment, too high price for widespread use, software development, integration of several technological processes, and the frequent need for equipment to use different materials simultaneously, which can create a problem with their compatibility.

The article's purpose is to review the existing modern solutions and implementation of equipment for hybrid polymer-based manufacturing to identify and systematize problems and formulate prospects for further research.

The article analyses the existing types of equipment that can be used to implement hybrid polymer-based manufacturing technologies. Their characteristics are compared, and the advantages and disadvantages are considered, which were later identified and systematized into three main problems: the inaccessibility of technically advanced equipment for small and medium businesses, as well as its excessive rigidity and low energy efficiency; significant limitations in the existing available solutions; insufficient research on the issue of polymers post-processing. The article considers the concept of equipment for hybrid polymer-based manufacturing, which would meet market demands and solve these main problems. The research presents a unique system of automated tool change that can combine different technologies in one operation without the operator's intervention.

Presented in the article information is an overview. Further, the research materials can be used to analyze the feasibility of using a parallel kinematics moving system in hybrid polymer-based manufacturing technologies.

**Keywords:** hybrid manufacturing technologies, additive technologies, parallel kinematics equipment, polymer materials  
Fig.: 11. References: 17.