

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.01: 621.77.04

DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-34-41

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОГО АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В. О. Цибуленко, В. А. Пасічник, Б. С. Воронцов*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»; 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37,
e-mail: tomosc2tv@gmail.com; voronts@gmail.com*

Технології адитивного виробництва (*Additive Manufacturing*), дедалі ширше використовуються у сучасному виробництві, набувають дедалі більшого значення, що зумовлює постійно зростаючий ринок. Даний набір технологій дає можливість створювати дуже складні металеві деталі зі складною поверхнею та низькою пористістю та гарними механічними властивостями. Адитивне виробництво широко використовується в таких областях, як автомобілебудування (завдяки швидкому та практично серійному виробництву працездатних прототипів з таких матеріалів, як титан, алюміній або сталь), авіабудування (можливості створювати деталі з алюмінію або титану за індивідуальними проєктами, наприклад, лопаті з внутрішніми каналами охолодження), стоматологія (дозволяє створювати точні вироби, такі як штангові кріплення або коронки та мости з таких матеріалів, як сплав кобальту з хромом або титану), охорона здоров'я (створення імплантів та протезів суглобів та кісток з титану. Дозволяє створювати складні градчасті структури). Однак, багатошаровий виробничий процес має певні недоліки, такі як відносно висока шорсткість поверхні, низька геометрична точність, а також необхідність видалення підтримуючих конструкцій після процесу друку деталі та подальшої термообробки. Тому існує попит на методи постобробки, що пропонують таку ж гнучкість проєктування, як і процес адитивного виробництва. Для вирішення цієї проблеми слід використовувати комбінацію з адитивних та субтрактивних методів обробки, а саме адитивна/субтрактивним гібридним виробництвом (*Additive/SubtractiveHybridManufacturing – ASHM*). Однак потрібно звернути увагу і на те, що методика розрахунку технологічних параметрів для адитивного виробництва мало вивчені. Теплові властивості оброблюваних матеріалів, які істотно залежать від зміни температури різання, значно впливають на характеристики термічної обробки. Тому теплові властивості, які використовуються для чисельного моделювання процесу різання, повинні визначатися залежно від температури різання.

Ключові слова: гібридний технологічний ланцюжок, адитивне виробництво, ASHM, моделювання процесу різання.

Additive Manufacturing technologies, increasingly used in modern manufacturing, are gaining in importance, resulting in an ever-growing market. This set of technologies makes it possible to create very complex metal parts with a complex surface and with low porosity and good mechanical properties. Additive manufacturing is widely used in such areas as the automotive industry (thanks to the rapid and almost serial production of workable prototypes from materials such as titanium, aluminum or steel), aircraft construction (the ability to create parts from aluminum or titanium according to individual projects, for example, blades with internal cooling channels), dentistry (allows you to create precision products such as rod mounts or crowns and bridges from materials such as an alloy of cobalt with chromium or titanium), healthcare (creating implants and prostheses of joints and bones from titanium allows you to create complex lattice structures). However, the multilayer manufacturing process also has certain disadvantages, such as relatively high surface roughness, low geometric accuracy, and the requirement to remove support structures after the part is printed and subsequently heat-treated. Therefore, there is a demand for post-processing methods that offer the same design flexibility as the additive Manufacturing itself. To solve this problem, a combination of additive and subtractive processing methods should be used, namely additive/subtractive

hybrid manufacturing (Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing – ASHM). However, it is necessary to pay attention to the fact that the methods for calculating technological parameters for additive manufacturing have been little studied. The thermal properties of the processed materials, which significantly depend on changes in the cutting temperature, have a significant impact on the characteristics of heat treatment. Therefore, the thermal properties used for the numerical simulation of the cutting process shall be determined depending on the cutting temperature.

Key words: Hybrid Process Chain, Additive Manufacturing, ASHM, Cutting Processes Modeling.

Вступ

Гібридизація є однією з провідних стратегій у розробці більш гнучких та ефективних виробничих процесів. Загалом гібридизація включає в себе і традиційні, і нетрадиційні процеси обробки. З іншого боку, розроблено концепцію гібридних систем обробки/виробництва, у яких два або більше окремих процесів обробки/виробництва об'єднані в одну систему.

Гібридні верстати (наприклад, фрезерно-токарні центри) поєднують різні операції обробки в рамках однієї обробної платформи [1]. Останнім часом спостерігається нова тенденція у розвитку гібридних виробничих процесів, що поєднують адитивні (AM) та субтрактивні (SM) процеси, які виконуються на одній гібридній виробничій платформі, що складається з багатофункціонального верстата з ЧПК та модуля AM [2, 3].

До основних галузей і причин використання гібридних адитивних систем у малосерійному виробництві можна віднести [4–6]:

1. Ремонт – гібридні машини дозволяють використовувати як адитивний, так і субтрактивний процес, і основним застосуванням гібридних систем є ремонт існуючих деталей.

2. Обробки поверхні – завдяки безшовному з'єднанню адитивного методу з фрезеруванням на верстатах з ЧПК всі внутрішні та зовнішні поверхні можуть бути відфрезеровані до якості традиційної обробки поверхні на верстатах з ЧПК.

3. Точність – гібридне адитивне виробництво дозволяє друкувати і фрезерувати кожну поверхню в одній і тій же системі координат, забезпечуючи більш жорсткі допуски.

В цілому, адитивне виробництво використовує порошкову технологію [7]. Добре відомо, що адитивне виробництво з лазерним плавленням принаймні на один порядок повільніше, ніж традиційне видалення металу за допомогою верстатів ЧПК. Технологічна дилема полягає в тому, щоб вибрати більш високу продуктивність і більш товстий шар порошку (але низьку якість обробки поверхні

через «ефект сходів», показаний на рисунку 1) або поліпшити якість обробки поверхні шляхом виконання більш повільного нанесення тонших шарів порошку.

Іншими словами, продуктивність процесу AM може бути збільшена за набагато більш високих витратах енергії, що дає більш товсті шари порошку і набагато швидше виготовлення деталі, але якість обробки поверхні погіршується. Навпаки, повільний процес, що обробляє тонкі шари порошку, створює кращу обробку поверхні. Навіть при більш повільному процесі–плавленні тонких шарів порошку для кращої якості поверхні – необхідна подальша механічна обробка. Саме тут завжди точилася боротьба між адитивним та субтрактивним виробництвом. Це аргумент на користь того, що ці процеси розглядалися як конкуруючі технології, а не як взаємодоповнюючі один одного (рис. 1), а продуктивність та обробка поверхні можуть контролюватись незалежно [8].

Гібридизація між адитивними та субтрактивними процесами в даний час є майже стандартною практикою для переважної більшості металевих деталей, вироблених AM, які додатково потребують механічної обробки для отримання відповідної якості поверхні, функціональних властивостей, а також запобігання надмірному залишковому напруженню [9].

Система, яка називається AIMS (адитивна система, інтегрована з субтрактивними методами), поєднує технологічні можливості двох різних виробничих підходів, тобто EBM (електронно-променево плавлення) або DMLS (пряме лазерне спікання металу) та швидку обробку з ЧПК (CNC-RP) до створення складних деталей. Рисунок 2 ілюструє основну концепцію системи AIMS, яка створює виріб через процеси AM (EBM) та SM (CNC-RP)[10].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Технології адитивного виробництва пропонують дуже складні геометрії, що індивідуально адаптуються, для виробництва деталей, які не можуть бути отримані звичайними методами [11]. Це стало можливим

завдяки адитивному характеру процесів, які нарощують деталі шар за шаром задля досягнення бажаної тривимірної (3D) форми [12].

За словами Хасімото, існує три ключові фактори, що дають бажані функціональні характеристики механічного виробу: матеріал,

міркувань, щоб адаптувати та підвищити загальну ефективність технологічного ланцюжка та самих виготовлених деталей.

Останніми роками кілька авторів досліджували деталі адитивного виробництва. Iqbal та інші [17] досліджували можливість використання обробних операцій для деталей

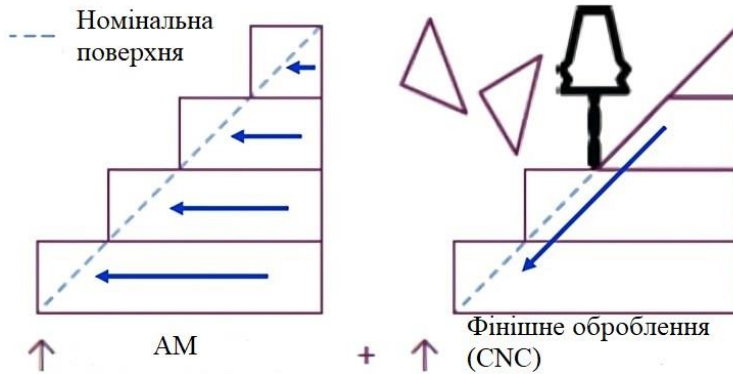


Рисунок 1 – Ефект інтеграції процесів з ЧПК AM та SM [8]

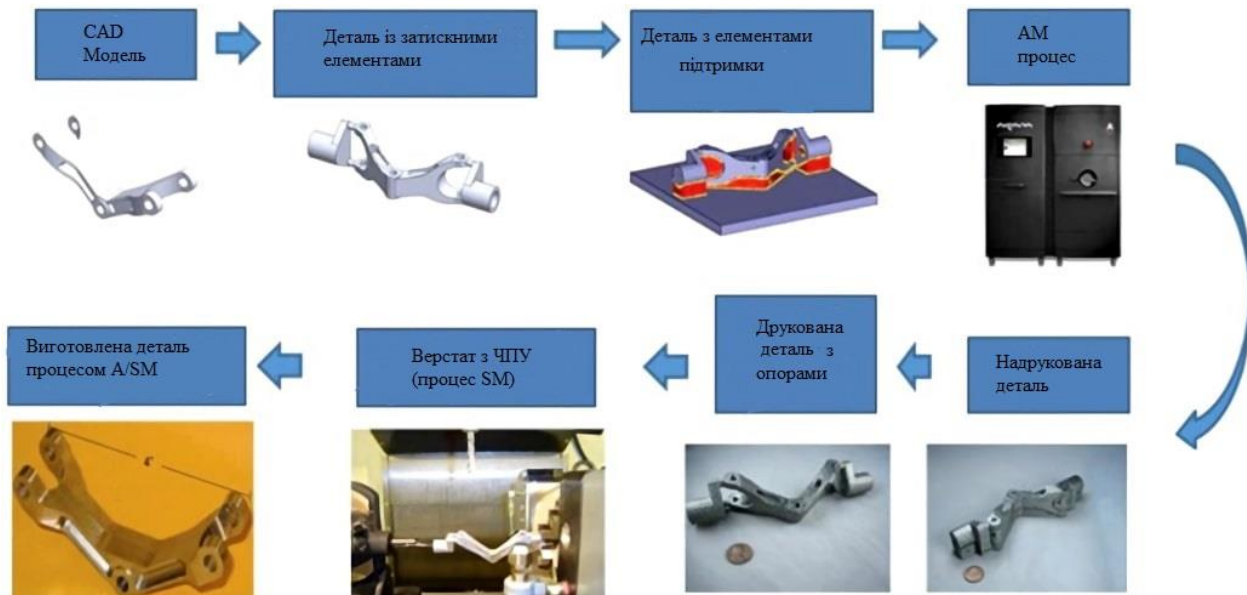


Рисунок 2 – Виготовлення деталі комбінацією методів адитивної та субтрактивної обробки [10]

дизайн продукту та виробничий процес [13]. Основним недоліком процесів AM є обмежена якість поверхні та точність розмірів.

Функціональні поверхні повинні бути оброблені, щоб знаходитись у межах бажаних допусків [14]. Крім того, опорні конструкції на поверхнях, що нависають, повинні бути механічно видалені з деталі [15]. В даний час субтрактивне оброблення проводиться на основі досвіду, накопиченого за десятиліття традиційних методів [16]. Адитивно вироблені деталі в основному обробляються як заготовка зі складною геометрією, хоча адитивний процес може бути використаний для більш складних

AM сітчастої форми для покращення цілісності поверхні з мінімальними зусиллями з обробки. Вплив параметрів свердління на цілісність поверхні отворів виготовлених AM виробів досліджено Karabulut та іншими [18]. Astakhov та інші [19] порівняли свердління адитивно отриманих деталей з обробленням литих деталей і запропонував адаптувати спеціальні конструкції інструментів.

Щоб подолати недоліки, пов'язані з деталями, виробленими AM, було розроблено нову технологію виробництва, названу адитивним/ субтрактивним гібридним виробництвом (ASHM), шляхом загальної

інтеграції обробки на верстатах з ЧПК в систему адитивного виробництва з метою доповнення переваг обох підходів, а також мінімізації їх обмежень [20]. За останні десятиліття було докладено велику різноманітність зусиль щодо розробки різних видів методів ASHM. Manogharan та інші [21] висунули новий підхід, об'єднавши SLM з

Цей метод АМ ефективніший за лазерне спікання (STL) і, наприкладі деталі маси 3,5 кг будувється в 20 разів швидше і завдяки високій точності високошвидкісні операції фрезерування можуть використовуватися скрізь, де потрібна висока точність. Гібридний верстат, що поєднує лазерне плавлення порошкового металу для адитивного

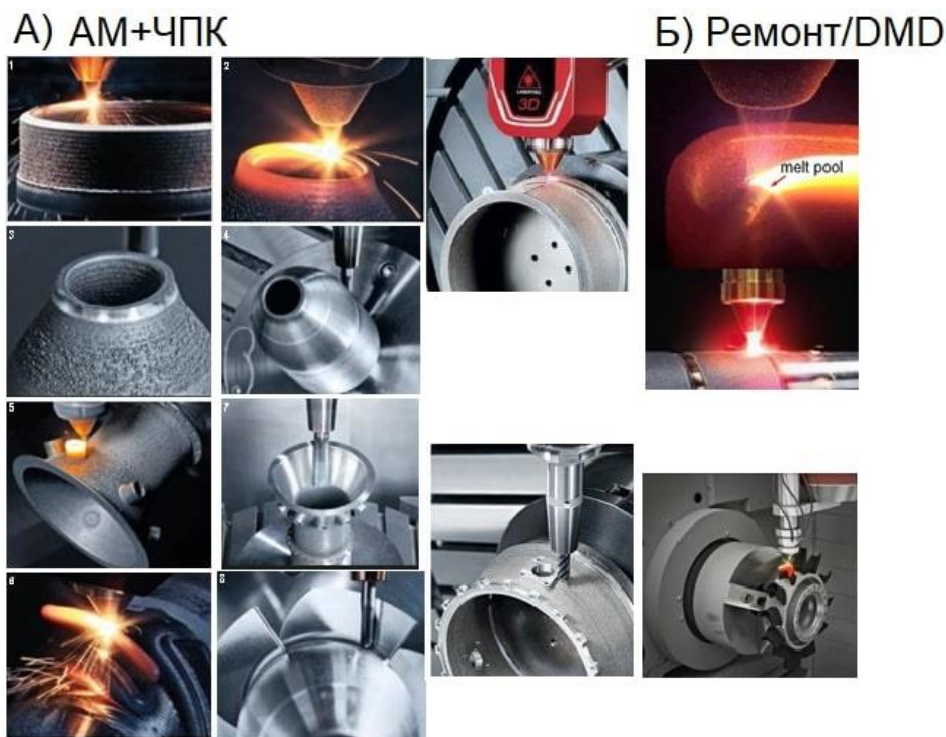


Рисунок 3 – Приклади використання АМ та обробки фрезерування та точіння з ЧПК (А) та ремонту (Б) [24, 25]

обробкою з ЧПК для вивчення того, як параметри обробки впливають на витрати, пов'язані з методами АМ та SM. Li та інші [22] запропонували новий 6-осьовий гібридний адитивно-субтрактивний виробничий процес з використанням роботизованої руки з шістьма ступенями вільності, який показав великий потенціал у скороченні відходів матеріалу та часу виробництва, а також у покращенні якості поверхні побудованих деталей. Duta інші [23] представили нову стратегію ASHM металевих деталей, використовуючи як АМ, так і прецизійне фрезерування.

Один з провідних виробників верстатів – DMG Mori також є лідером у розробці гібридних АМ/SM платформ для гібридного виготовлення, нанесення покриттів та відновлення/ремонту [24]. Стандартним універсальним гібридним верстатом є обробний центр Lasertec 65 3D, в якому використовується процес зварювання порошковим напиленням (рис. 3).

виробництва з 5-тиосьовою одночасною обробкою на верстатах з ЧПК, оснащений діодною лазерною голівкою потужністю 2 кВт, розташованою в шпинделі верстата з інтерфейсом HSK.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Наразі ведеться уточнення методики розрахунку технологічних параметрів для традиційних матеріалів. Однак для адитивного виробництва зараз тільки починаються перші кроки для уточнення методики розрахунку технологічних параметрів.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є огляд та аналіз перспективи використання гібридного адитивно-субтрактивного виробництва, результатів дослідження у різних літературних джерелах, а також огляд різних видів комбінацій використання адитивно-

субтрактивного методу виготовлення деталей у промисловості. Також розглянуто деякі методи розрахунку технологічних параметрів, які можуть бути використані для адитивного виробництва.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Як один з основних методів формування різних деталей, що забезпечують їх необхідну точність і якість виготовлення, процес різання протягом багатьох десятиліть є предметом вивчення численними дослідниками. Одним із найпотужніших інструментів для вивчення процесу різання став процес його моделювання. Особливих успіхів було досягнуто у розробці таких моделей, як, наприклад, за методом кінцевих елементів [26]. В останні десятиліття цей метод часто успішно використовується для вивчення характеристик процесу різання [27], зокрема термічних [28] характеристик, зношування інструменту [29], фізико-механічних характеристик граничних шарів заготовки [30] тощо.

Для того, щоб мати можливість застосовувати моделі різання, були проведені численні дослідження створення компонентів тріади FE-моделі: моделі оброблюваного матеріалу (конститутивне рівняння), моделі тертя і моделі руйнування оброблюваного матеріалу. Значні зусилля були зроблені для визначення моделей матеріалів, придатних для моделей різання [31], і навіть методів розрахунку параметрів конститутивного рівняння [32]. Значних успіхів було досягнуто в оцінці контактної взаємодії між інструментом і заготовкою [33] та у розробці моделей тертя, що характеризують цю взаємодію [34]. Детальне вивчення процесів руйнування оброблюваного матеріалу та формування стружки [35] сприяло розробці різних моделей руйнування оброблюваного матеріалу [36]. Це забезпечило розробку моделей руйнування різних сталей, що важко обробляються, і титанових сплавів при різанні [37,38].

Не зважаючи на значні успіхи у застосуванні моделей для прогнозування характеристик процесу різання, результати моделювання відрізняються від відповідних експериментальних даних. Для отримання характеристик обробки, що відповідають конкретним процесам видалення матеріалу, необхідно використовувати реалістичні значення параметрів моделі різання. У той час, як були проведені великі дослідження щодо встановлення параметрів моделі матеріалу,

моделі тертя та моделі руйнування оброблюваного матеріалу, мало уваги приділялося визначенню теплових властивостей матеріалу для моделювання процесу різання. Тим не менш, теплові властивості оброблюваного матеріалу значно впливають на характеристики процесу різання і, зокрема, на величину температури різання. Моделювання температури різання, поряд з іншими важливими характеристиками процесу різання, приділяється особлива увага. Теплові властивості оброблюваних матеріалів мають переважаючий вплив на розподіл температур у різних зонах різання [39]. Встановлено значний вплив теплових властивостей на параметри рівняння, що застосовується до моделі оброблюваного матеріалу [40], наприклад, прогнозування температури різання для складних інструментів різання клиноподібних форм [41], при механічній обробці сталей, що важко обробляються, і титанових сплавів [42] при використанні інструментів з покриттями [43].

Фундаментальні властивості матеріалу, такі, як механічні та теплові властивості є необхідною частиною кожної моделі різання цих матеріалів. Визначення теплових зв'язків матеріалів було предметом досліджень протягом тривалого часу. У цей період були розроблені усталені методи та процедури визначення теплових властивостей. Основні процедури визначення зазначених властивостей процесів видалення матеріалу викладені у огляді Девісата інші [44].

Оскільки технологія ASHM є комплексним поєднанням адитивних і субтрактивних процесів, вона потребує й комплексного урахування параметрів і особливостей цих технологій. До основних факторів відносяться характеристики матеріалу та обладнання, параметри керування технологіями, вимоги до точності та геометрії поверхні та одержуваних деталей, вимоги до шорсткості окремих елементів деталі, параметри і результати подальшої обробки деталі, зокрема термообробки, зокрема термічних характеристик, фізико-механічних характеристик граничних шарів деталей, обладнання та інструментарій для механічної обробки, зношування інструменту, руйнування оброблюваного матеріалу та формування стружки, автоматизація кожного з процесів, зв'язок обладнання в єдиний технологічний комплекс тощо.

Завдання вибору та можливої оптимізації процесу вибору гібридної адитивно-субтрак-

тивної технології можна сформулювати, базуючись на таких параметрах: C_{am} – вартість амортизації обладнання за одиницю часу; C_{va} – вартість витратного матеріалу адитивного процесу (порошок, дріт) на деталь (за винятком матеріалів, що потраплятимуть на повторне використання); C_{vs} – вартість витратного матеріалу субтрактивного процесу (інструмент, змашувально-охолоджувальне технологічне середовище) на деталь; E_a – вартість енерговитрата адитивного процесу за одиницю часу; E_s – вартість енерговитрат субтрактивного процесу за одиницю часу; T_a – тривалість адитивного процесу виготовлення деталі; T_s – тривалість субтрактивного процесу виготовлення деталі. Тоді загальні витрати на виготовлення деталі за технологією ASHM становитимуть:

$$C_{ASHM} = C_{am} \cdot (T_a + T_s) + C_{va} + C_{vs} + E_a T_a + E_s T_s. \quad (1)$$

Основними обмеженнями реалізації ASHM процесу будуть σ_p – проєктні фізико-механічні властивості; Δ_p – проєктна якість поверхні (шорсткість, відхилення геометричної форми тощо).

Тоді задача оптимізації виготовлення i -ї деталі за технологією ASHM може бути сформульована в загальному виді так:

$$\begin{cases} C_{ASHM,i} \rightarrow \min \\ \sigma_i \geq \sigma_{pi} \\ \Delta_i \leq \Delta_{pi} \end{cases} \quad (2)$$

Тобто, основним критерієм оптимізації ASHM технології повинна бути економічна ефективність цього процесу, яка враховує собівартість складових життєвого циклу процесу, продуктивність, енерговитрати тощо. Обмеженнями повинні бути фізико-механічні властивості та точність, необхідна для виробів. Так, якщо вимоги до точності не дуже високі, збільшуватиметься частка адитивної технології. З підвищенням вимог до точності зростатиме частка субтрактивної технології. Дослідження, аналіз та врахування всіх факторів, що впливають на ASHM технологію дозволить забезпечити ефективно її застосування.

Висновки

Найбільш важливими є гібридні процеси, які поєднують адитивні та субтрактивні (обробка з ЧПК) процеси (AM/SM CNC). Вони використовуються для виготовлення деталей з металевих порошків або ремонту/повторного виготовлення зношених або пошкоджених деталей.

Гібридні виробничі платформи складаються з багатоосьових верстатів із ЧПК та модулів АМ, які використовують різні методи, наприклад: FDM (моделювання методом наплавлення), SLM (селективного лазерного плавлення), EBM (електронно-променева плавка), DED (пряме лазерне наплавлення). На практиці виробники верстатів використовують різні назви лазерних методів, такі як, наприклад, DMD (пряме нанесення металу), DED (пряме лазерне наплавлення), PBF (плавлення порошкового шару) або POM (прецизійне оптичне виробництво). Одним з найбільш практичних застосувань процесів з ЧПК АМ/SM є ремонт великих складних деталей, здебільшого з аерокосмічної промисловості. Для цього використовується спеціальна LRT (лазерна ремонтна техніка). В даний час у промисловості інтенсивно використовуються спеціалізовані гібридні виробничі платформи, що складаються з багатоосьових та багатофункціональних верстатів, оснащених спеціальними лазерними головками, 3D лазерними сканерами, інструментами 3D-контролю (сенсорними зондами). Крім того, доступні високоінтегровані CAD/CAM та CAI (Computer Aided Inspection).

Бажання скоротити час та вартість розробки нових та оптимізація існуючих процесів різання шляхом моделювання та симуляції вимагає відповідних моделей обробки, таких як чисельні, аналітичні та емпіричні моделі. Завдяки зусиллям численних дослідників було досягнуто значного прогресу у розробленні чисельних моделей для процесів різання, головним чином кінцево-елементних моделей [45]. Однак подальший успіх за більш точним моделюванням характеристик процесу кінетичного та термічних моделей різання, а також за прогнозуванням зносу інструменту та фізико-механічних характеристик різальної поверхні заготовки стримується недостатнім описом феноменології умов контакту «інструмент-стружка-заготовка» у складових моделях різання. Фрикційна модель, а також інші складові моделі, такі як моделі матеріалу та пошкоджень, відіграють вирішальну роль у моделюванні контакту інструменту з обробленим матеріалом. Результати при моделюванні характеристик процесу різання, зокрема процесів зношування інструменту та формування фізико-механічних характеристик оброблюваних шарів матеріалу, істотно залежать від адекватного опису моделі тертя процесів у зонах контакту інструменту зі

стружкою і заготовкою. Дослідження всіх представлених у статті факторів, що впливають на ASHM технологію, дозволить оцінити ефективність її застосування.

Література / References

1. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., et al., Hybrid processes in manufacturing, CIRP Annals-Manuf. Technol. 2014. No 63/2. P. 561–583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
2. Grzesik W., Advanced machining processes of metallic materials, Amsterdam, Elsevier. 2017. URL: <https://www.elsevier.com/books/advanced-machining-processes-of-metallic-materials/grzesik/978-0-08-044534-2>
3. Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T., A Review of hybrid manufacturing processes, Int. J. Comp. Integr. Manuf., 2013, No 26, P. 596–615. URL: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>
4. Norfolk M., 2018, The top 5 reasons hybrid additive manufacturing make sense, <https://fabrisonic.com/top-five-reasons-use-hybrid-additive-manufacturing-machines-vs-single-focus-special-machines-running-parallel/>
5. Hudson R., Hybrid system combines additive and subtractive manufacturing. URL: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/hybrid-system-combines-additive-subtractive-manufacturing/>
6. Yamazaki T., Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive technology with CNC machining, Proc. CIRP, 2016, No 42, P. 81–86. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>
7. Hascoët J.-Y., Querard V., Rauch M., Interests of 5 axis toolpaths generation for wire ARC additive manufacturing of aluminium alloys, J. Mach. Eng., 2017. No 17/3, P. 51–65. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-7e3203dd-6426-4b82-bbd2-257b322df0ea>
8. Du W., Bai Q., Zhang B., A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts, Proc. Manuf. 2016. No 5. P. 1018–1030. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.067>
9. Jones J.B., 2014, The synergies of hybridizing CNC and additive manufacturing, Hybrid Manufacturing Technologies Ltd. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Synergies-of-Hybridizing-CNC-and-Additive-Jones/ca8e2e920ebc7eb5abfbca7e505e0faa3d71a5c6>
10. Manogharan G., Wysk R., Harrysson O., Aman R., AIMS – a metal additive hybrid manufacturing system: system architecture and attributes, Proc. Manuf. 2015/ No 1. P. 273–286. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.021>
11. Thompson MK, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell RI, Gibson I, Bernard A, Schulz J, Graf P, Ahuja B, Martina F Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Ann. 2016. No 65(2). P.737–760 URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
12. Gebhardt A, Kessler J, Thurn L (2016) 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). 2, neubearbeitet und, erweiterte edn. Carl Hanser Verlag, München URL: http://files.hanser.de/Files/Article/ARTK_LPR_9783446446724_0001.pdf
13. Hashimoto F, Chaudhari RG, Melkote SN (2016) Characteristics and performance of surfaces created by various finishing methods. Proced CIRP 45:20 URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.052>
14. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Int J Adv Manuf Technol. 2015. No. 81(1–4). P. 465–481 URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
15. variations management for additive manufactured product. CIRP Ann Manuf Technol 66:161–164 URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.034>
16. Wei D, Bai Q, Zhang B (2016) A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. Proced Manuf 5:1018–1030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.067>
17. Iquebal A, Amri S, Shrestha S, Wang Z, Manogharan G, Bukkapatnam S (2017) Longitudinal milling and fine abrasive finishing operations to improve surface integrity of metal AM components. ProcedManuf 10:990–996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.090>
18. Karabulut Y., Kaynak Y., 2020. Drilling Process and Resulting Surface Properties of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing, Procedia CIRP, 87, 355–359. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.110>
19. Astakhov V., Patel S., 2019, *Development of the Basic Drill Design for Cored Holes in Additive and Subtractive Manufacturing*, Additive and Subtractive Manufacturing, 3, 113–148, URL: <https://doi.org/10.1515/9783110549775-003>.
20. B Lauwers, F Klocke, A Klink, et al. Hy-

- brid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, 63(2): 561-583. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>
21. G Manogharan, R A Wysk, O L AHarrison. Additive manufacturing– integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 29(5): 473-488. URL: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067920>
22. L Li, A Haghghi, Y Yang. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 33: 150-160. URL: <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2018.05.008>
23. W Du, Q Bai, B Zhang. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. *Procedia Manufacturing*, 2016, 5: 1018-1030. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.067>
24. Additive Manufacturing in Milling Quality. www.dmgmori.com
25. Laser Deposition Technology (LDT): www.rpm-innovations.com.
26. Mourtzis D, Doukas M, Bernidaki D (2014) Simulation in manufacturing: review and challenges. *Procedia CIRP* 25:213–229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
27. Arrazola PJ, Özel T, Umbrello D, Davies M, Jawahir I (2013) Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Ann Manuf Technol* 62:695–718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>
28. Grzesik W (2020) Modelling of heat generation and transfer in metal cutting: a short review. *J Mach Eng* 20(1):24–33. URL: <https://doi.org/10.36897/jme/117814>
29. Courbon C et al (2021) A 3D modeling strategy to predict efficiently cutting tool wear in longitudinal turning of AISI 1045 steel. *CIRP Ann* 70(1):57–60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.071>
30. Eivani AR et al (2021) A novel approach to determine residual stress field during FSW of AZ91 Mg alloy using combined smoothed particle hydrodynamics/neuro-fuzzy computations and ultrasonic testing. *J Magnes Alloys* 9(4):1304–1328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.11.018>
31. Heisel U et al (2009) Thermomechanical material models in the modeling of cutting processes. *ZWF Z fuer Wirtsch Fabr* 104(6):482–491. (In German). URL: <https://doi.org/10.3139/104.110104>
32. Storchak M, Rupp P, Möhring H-C, Stehle T (2019) Determination of Johnson–Cook constitutive parameters for cutting simulations. *Metals* 9(4):473. URL: <https://doi.org/10.3390/met9040473>
33. Melkote SN (2017) et. al.: Advances in material and friction data for modeling of metal machining. *CIRP Ann* 66(2):731–754. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.002>
34. Saelzer J et al (2021) Modelling of the friction in the chip formation zone depending on the rake face topography. *Wear* 477:203802. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203802>
35. Li J, et al (2021) An experimental and finite element investigation of chip separation criteria in metal cutting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 10.1007/s00170-021-07461-0. URL: <https://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07461-0>
36. Heisel U et al (2009) Breakage models for the modeling of cutting processes. *ZWF* 104(5):330–339 (In German). URL: <https://doi.org/10.3139/104.110057>
37. Sela A et al (2021) Inverse identification of the ductile failure law for Ti6Al4V based on orthogonal cutting experimental outcomes. *Metals* 11:1154. URL: <https://doi.org/10.3390/met11081154>
38. Zhang C, Choi H (2021) Study of segmented chip formation in cutting of high-strength lightweight alloys. *Int J Adv Manuf Technol* 112:2683–2703. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06057-4>
39. Storchak M, Kushner V, Möhring H-C, Stehle T (2021) Refinement of temperature determination in cutting zones. *J Mech Sci Technol* 35(8). URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0736-4>
40. Osorio-Pinzon JC, Abolghasem S, Casas-Rodriguez JP (2019) Predicting the Johnson-Cook constitutive model constants using temperature rise distribution in plane strain machining. *Int J Adv Manuf Technol* 105(1-4):279–294. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04225-9>
41. Hu C et al (2020) Cutting temperature prediction in negative-rake-angle machining with chamfered insert based on a modified slip filed model. *Int J Mech Sci* 167:105273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105273>
42. Kumar A, Bhardwaj R, Joshi SS (2020) Thermal modeling of drilling process in titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Mach Sci Technol* 24(3):341–365. URL: <https://doi.org/10.1080/10910344.2019.1698607>
43. Tu L et al (2019) Temperature distribution of cubic boron nitride–coated cutting tools by finite element analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 105(7-8):3197–3207. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04498-0>

44. Davies MA, Ueda T, M'Saoubi R, Mul-lany B, Cooke AL (2007) On the measurement of temperature in material removal processes. CIRP Ann 56(2):581–604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.009>

45. Arrazola PJ, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes. Ann CIRP 2013; Vol. 62(Issue 2):695–718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>.