8. Zhao C., Liu Y., & Wang J. (2024). Comparative Wear and Friction Analysis of Sliding Surface Materials for Large-Scale Hydrostatic Bearings. Advanced Engineering Materials. https://doi.org/10.1002/adem.202401733

УДК 681.6-023.5

Катріч С.Г., аспірант
Дмитрієв Д.О., докт .техн. наук, професор
Кузмічов М.Ф., аспірант
Херсонський національний технічний університет

АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО. ПЕРЕВАГИ, НЕДОЛІКИ, ПЕРСПЕКТИВИ

Адитивне виробництво (3D-друк) – це технологія створення деталей шляхом послідовного нашарування матеріалу за даними цифрової моделі. Вона дозволяє виготовляти дуже складні геометричні форми, які неможливо або дуже важко отримати традиційними методами. Адитивні технології широко застосовуються в авіа- та автомобілебудуванні, медицині і стоматології для швидкого виготовлення легких, міцних і точних деталей та прототипів. Наприклад, за допомогою адитивних технологій створюють складні металеві деталі з внутрішніми каналами охолодження та ізольованою структурою, що підвищує їх механічні властивості.

Адитивне виробництво має низку суттєвих переваг, що визначають його зростаючу популярність у багатьох галузях. Однією з ключових переваг є можливість виготовлення виробів складної геометрії без необхідності створення спеціальної оснастки. Це дозволяє реалізовувати конструктивні рішення, які неможливо або економічно недоцільно реалізувати традиційними методами, зокрема інтегрування внутрішніх порожнин, решітчастих структур і легких, але міцних форм. Ще однією важливою перевагою є високий рівень персоналізації продукції — можливість швидко і точно виготовляти індивідуалізовані деталі, зокрема в медицині (імпланти, ортопедичні елементи), унікальні компоненти для машинобудування, авіації тощо [1 с. 9].

Важливо зазначити суттєву економію матеріалів завдяки тому, що адитивні технології працюють за принципом нашарування, тобто формування виробу виключно в необхідних об’ємах без надлишків та утворення великої кількості відходів. Це позитивно впливає і на економічні показники, і на екологічну стійкість виробництва. Крім того, АМ скорочує час на виготовлення прототипів, пришвидшуючи інноваційний цикл: перехід від CAD-моделі до готового об’єкта може зайняти години або дні замість тижнів чи місяців, як це притаманно класичному підходу [5].

Проте, поряд із перевагами, існують і обмеження, які поки не дозволяють повноцінно витіснити традиційне виробництво. Одним із головних недоліків є відносно низька продуктивність: друк великих об'єктів або серійне виготовлення деталей потребує багато часу, що унеможливлює ефективне масштабування на масове виробництво. Також слід враховувати обмеженість у виборі матеріалів: не всі метали, сплави або полімери можуть бути використані в адитивних процесах, а сумісні матеріали часто потребують спеціальної підготовки або є дорогими.

Іншим важливим недоліком є якість поверхні та точність деталей. Через пошарову природу формування виникає висока шорсткість, дефекти зчеплення шарів, а також відхилення від допусків, що вимагає механічної пост-обробки. Обладнання для промислового 3D-друку, особливо металевого залишається дорогим як у придбанні, так і в обслуговуванні. Також слід згадати про ризики, пов’язані з інтелектуальною власністю, можливість нелегального копіювання та відтворення виробів без відповідного контролю може створити проблеми правового характеру [2 с. 35].

Таким чином, попри численні переваги, які дозволяють реалізовувати складні, інноваційні й індивідуальні проекти, 3D-друк все ще має низку технічних, матеріалознавчих і економічних обмежень. Їх подолання є ключовим завданням для подальшого розвитку цієї технології, зокрема в напрямку гібридних систем, що поєднують сильні сторони адитивного та субтрактивного виробництва (Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing – ASHM).

У гібридних системах поєднуються адитивні та субтрактивні операції на одній платформі. На верстаті з лазером і ЧПУ після 3D-друку виріб одразу обробляють фрезою для підвищення точності і якості поверхні. Це дозволяє зберегти гнучкість проектування та складність форми адитивного процесу, водночас забезпечуючи малу шорсткість і точні розміри, як у традиційних деталях. Одразу після лазерного спікання деталі, її можна автоматично заточити й відполірувати без вивантаження, зменшуючи час на постобробку. Гібридні технології відкривають нові можливості для економічного виготовлення деталей, які поодинці навряд чи виготовляються ефективно одним із процесів [4].

Проте й гібриди мають обмеження: складність синхронізації адитивного і фрезерного модулів, надійність приводу лазера/порошку, обмежений набір сумісних матеріалів, а також висока вартість таких комплексів. Далеко не всі металеві сплави можна одночасно паяти лазером і точно фрезерувати через різні характеристики теплового розширення. Відточене програмування і моделювання процесів наразі ще знаходяться у стадії розвитку.

Гібридні технології відкривають нові можливості для економічного виготовлення деталей, які поодинці навряд чи виготовляються ефективно одним із процесів [6 с. 598].

Одним із напрямів удосконалення адитивного виробництва є інтеграція цифрових технологій та автоматизованих систем контролю, зокрема сенсорного моніторингу температури, вологості, напружень, що виникають у матеріалі під час друку. Застосування систем штучного інтелекту дозволяє не лише прогнозувати можливі дефекти виробу, а й у режимі реального часу коригувати параметри друку, забезпечуючи стабільну якість кінцевої продукції. Це особливо актуально при виготовленні високотехнологічних деталей, зокрема для аерокосмічної чи оборонної галузей, де брак неприйнятний [3].

Окрему увагу слід звернути на роль адитивних технологій у концепції сталої економіки. Використання АМ знижує логістичне навантаження, дозволяє виготовляти вироби ближче до споживача, оптимізувати виробничі ланцюги. За рахунок скорочення відходів, можливості повторного використання порошків і впровадження біодеградованих матеріалів АМ може стати важливим інструментом «зеленої» трансформації промисловості. У деяких країнах адитивне виробництво вже використовується для відновлення зношених деталей, продовження життєвого циклу продукції, що знижує потребу в нових ресурсах.

Висновок. Отже, адитивне виробництво, попри ще низку технологічних бар'єрів, уже сьогодні формує нову індустріальну парадигму від лінійного масового виробництва до гнучкого, індивідуалізованого та цифрового. Його основними перевагами є можливість виготовлення складних форм, зниження втрат матеріалу, скорочення термінів розробки продукції, а також підтримка сталого розвитку. Водночас технічні виклики пов'язані з обмеженим вибором матеріалів, точністю, високою вартістю обладнання та якістю виробів вимагають подальших досліджень і вдосконалення.

Особливої уваги заслуговує розвиток гібридного адитивно-субтрактивного виробництва, яке дозволяє поєднувати гнучкість 3D-друку з точністю традиційної обробки. Такий підхід може стати ключовим для інтеграції АМ у масове промислове виробництво. Успіх цієї технології залежатиме від синергії між наукою, бізнесом і промисловою політикою, а також від здатності інженерної спільноти адаптуватися до нової виробничої логіки. Перспективи АМ це не лише технологічна еволюція, а фундаментальна зміна у сприйнятті самого процесу створення речей.

Список посилань

1. Андрощук Г.О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, Технології, Інновації*. 2017. – № 1. – С. 9–16.
2. Цибуленко В.О., Пасічник В.А., Воронцов Б.С. Перспективи використання гібридного адитивно-субтрактивного виробництва. *Науковий вісник ІФНТУНГ. Механічна інженерія*. 2022. № 1(52). С. 34–41.
3. Lalegani Dezaki M., Serjouei A., Zolfagharian A., Fotouhi M., Moradi M., Ariffin M.K.A., Bodaghi M. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. *Advanced Powder Materials*. 2022. Vol. 1, No. 4. Article 100054.
4. Thomas D.S., Gilbert S.W. *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion*. NIST Special Publication 1176. Gaithersburg, 2015.
5. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L.D. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors (Basel)*. 2024. Vol. 24, No. 9. 2668.
6. Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2013. Vol. 26, No. 7. P. 596–615.

УДК 621.941.2.014

Чернишов О.В., старший викладач
Музичка Д.Г., канд. техн. наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, avch2006@ukr.net

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ СТРУЖКИ ДО ПЕРЕРОБКИ

Під час механічної обробки деталей утворюється значна кількість металевої стружки, яка, з одного боку, є відходами механообробного виробництва, а з іншого — становить цінну сировину для металургії, у тому числі порошкової.

Обробка різанням металевих заготовок частіше за все відбувається з використанням мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Кількість рідини, що покриває поверхню стружки при виході із зони різання, складає приблизно 30 % від маси стружки. При транспортуванні стружки, її відстоюванні і стоці кількість МОР, що змочує її, зменшується до 8–10 %. У разі транспортування неочищеної стружки забруднюється навколишнє середовище. Крім того, спостерігаються значні втрати кількості мастила.

При переплавці непідготовленої стружки спостерігається її вигорання обсягом до 30%. При цьому вигорає в основному залізо і леговані елементи (20–25 % хрому, 40–45% марганцю, 12–16% вольфраму та ін.) [1]. Для виробництва легованих сталей і феросплавів допустимо застосовувати стружку, яка містить на поверхні не більше 1 % домішок МОР.

Для очищення стружки від залишків МОР на кафедрі машинобудівних технологій та інженерії розроблені ряд сушильних і миючих машин для підготовки металевої стружки до переробки. Деякі розроблені конструкції машин для миття стружки мають механізми типу циліндра, що обертається, встановленого під кутом до горизонту. Вони добре вписуються в комплексну систему підготовки металевої стружки до переробки завдяки підвищений продуктивності і якості очищуваного матеріалу.

Машина для миття металевої стружки (рис. 1) містить миючу камеру, що має вигляд нахиленого жолобу з багатогвинтовим шнековим ворушителем стружки, в верхній частині якого закріплені розпилювачі-дощовики. Миюча камера поперек розділена вертикальною перегородкою на два відсіки співвідношенні 2:1 – інтенсивного миття та доочищення відповідно. Верхній край перегородки розташований на рівні верхнього краю камери, а нижній край доходить до рівня шнеків. У відсіку інтенсивного миття встановлені ультразвукові гідродинамічні вібратори, а привод шнекового ворушителя розташований з верхнього торця нахиленого жолоба. Внаслідок такого розділення миючої камери виключається повторне замаслення металевої стружки під час її розвантаження. Розташування приводу шнеків у верхній частині миючої камери веде до покращення її