

**С.В. Бурбурська, аспірант**  
**В.А. Пасічник, д.т.н., проф.**

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

## Можливості адитивних технологій у виготовленні високотехнологічної продукції машинобудування та біомедичної інженерії

*Адитивні технології – відносно нові для сфери машинобудування, проте вкрай актуальні і перспективні. Зрозуміти можливості таких технологій, визначити їх місце серед усталених технологій – важливе завдання сьогодення. В статті аналізується місце адитивних технологій, їх можливості з точки зору формоутворення, створення екстремально складних за формою деталей, що мають розвинену внутрішню структуру та структуру поверхні. Розглянуто можливості, які надають мультиматеріальні адитивні технології. Пояснюються причини парадоксальної властивості адитивних технологій бути інваріантними для складності деталей. Аналізуються основні можливості і тренди застосування адитивних технологій у проектуванні й виготовленні високотехнологічних деталей в машинобудуванні та біомедичній інженерії.*

**Ключові слова:** адитивні технології; 3д-друк; високі технології; машинобудування; біомедична інженерія.

**Актуальність теми.** Адитивні технології, або більш поширена побутова назва – 3д-друк, є відносно новою для машинобудування технологією отримання прототипів і готових деталей. Тому розуміння того, що це за технології, яка їхня роль і місце серед інших традиційних технологій машинобудування, які можливості надають адитивні технології, наскільки це вигідно з огляду на час і на вартість, ці та й багато інших запитань потребують пошуку відповідей та аналізу. Поряд із новими технологіями, якими є адитивні технології, активно розвивається й біомедична інженерія. Розкриття можливостей застосування адитивних технологій у створенні високотехнологічних виробів у машинобудуванні та в біомедичній інженерії є актуальною тематикою, яка досліджується у цій статті.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Технологічні процеси виготовлення деталей, які змінюють їх форму на макрорівні, можуть бути розділені на класи [1, с. 135]: *дистрибутивні* – такі, результатом яких є зміна початкової форми заготовки у нову форму заготовки або готової деталі шляхом перерозподілу (дистрибуції) матеріалу; *субтрактивні* – такі, результатом яких є зміна початкової форми заготовки у нову шляхом видалення (субтракції) частини матеріалу з окремих поверхонь деталі; *адитивні* – такі, результатом яких є утворення форми готової деталі або високоточної заготовки шляхом пошарового додавання матеріалу або композиції матеріалів. Зазначимо, що процеси, які не змінюють форму на макрорівні, наприклад, оздоблювально-зміцнююче оброблення, нанесення захисних функціональних покриттів тощо, не підпадають під цю класифікацію.

*Субтрактивні процеси* є основою сучасного машинобудування, це всі технології механічного оброблення, лазерного, плазмового, гідроабразивного різання, технології абразивного оброблення, коли на кожній технологічній операції видаляється припуск і тим самим форма поверхні та параметри її якості наближаються до визначених конструктором.

*Дистрибутивні процеси* здебільшого спрямовані на отримання заготовок. До таких процесів належать процеси лиття, кування, штампування, гнуття тощо. Точність та якість форми, отриманої таким способом у переважній більшості випадків не задовольняє вимоги, визначені конструктором, а отже, потребують наступного оброблення одним зі субтрактивних процесів.

*Адитивні процеси* і технології наразі є малопоширеними, проте їх можливості й вплив на всю структуру системи технологій, задіяних у виготовленні продукції, наразі недооцінені. Виробництво, в основі якого лежать адитивні технології як основний процес формоутворення, називають адитивним виробництвом (англ. *Additive Manufacturing*) [2, с. 1(23)]. Міжнародний стандарт ASTM F2792.1549323-1 визначає: «*Адитивні технології – це процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів за даними тривимірних цифрових моделей, зазвичай шар над шаром, на відміну від субтрактивних технологічних процесів*». Тут мова йде не про протиставлення адитивних і субтрактивних технологій, а про підкреслення принципової відмінності цих технологій і про те, що адитивні технології органічно розширюють не задіяний до останнього часу сектор виробничих технологій. Саме цей стандарт виокремлює 7 основних типів адитивних технологій, а саме: 1. *Material Extrusion* – витискування матеріалу; 2. *Material Jetting* – розбрикування основного матеріалу; 3. *Binder Jetting* – розбрикування зв'язуючого матеріалу; 4. *Sheet Lamination* – з'єднання листових матеріалів; 5. *Vat Photopolymerization* – фотополімеризація у ванні; 6. *Powder Bed Fusion* – розплавлення матеріалу в наперед сформованому

шарі; 7. *Directed Energy Deposition* – безпосереднє підведення енергії у місце побудови. Зазначимо, що всі ці без винятку технології суттєво розширюють можливості сучасного виробництва високотехнологічної продукції, а в деяких випадках ці можливості є революційними, адже інші технології не дозволяють взагалі реалізувати складні за формою вироби. Сьогодні вже можна стверджувати, що адитивні технології забезпечують широкий спектр доступних матеріалів з добре прогнозованими фізико-механічними властивостями, дають безпрецедентні можливості щодо формоутворення, є достатньо ефективними з економічної точки зору. До екстремально складних за формою виробів належить високотехнологічна продукція машинобудування зокрема [3, с. 838] та кастомні вироби біомедицинської інженерії [4, с. 86]. І якщо в першому випадку мова йде про революцію у проектуванні складних форм та економічні переваги, то в другому – про створення принципово нових можливостей якості життя людини недосяжних дотепер.

**Метою статті** є дослідження можливостей застосування адитивних технологій у створенні високотехнологічних виробів у машинобудуванні та у біомедицинській інженерії, визначення їх місця серед конвенціональних технологій, ролей, які адитивні технології відіграють сьогодні й будуть відігравати в майбутньому.

**Викладення основного матеріалу.** *Загальні відмінності процесу формоутворення.* Адитивні технології за своєю суттю передбачають дозовану подачу матеріалу тільки в область формоутворення. Винятком для деяких технологій є лише зони формування підпорок. Якщо проаналізувати місце адитивних технологій з точки зору забезпечення кількості координат, необхідних для формоутворення (рис. 1), то побачимо, що традиційні конвенціональні субтрактивні технології без *числового програмного керування* (ЧПК) процесом застосовуються переважно для формоутворення деталей з кількістю координат 1–2.

Кількість координат забезпечення формоутворення	6			+
	5		+	+
	4		+	+
	3		+	+
	2	+		
	1	+		
Технології		без ЧПК	з ЧПК	Адитивні
		Конвенціональні субтрактивні		

Рис. 1. Основні сфери застосування конвенціональних та адитивних технологій

Це не означає, що такі технології не можуть застосовуватися під час виготовлення більш складних форм (наприклад, художнє литво), а означає, що лівова частка застосування й максимальна ефективність стосується простих за формою деталей. Можуть бути складні за вимогами до поверхні процеси, (наприклад, шліфування), але сама форма здебільшого буде мати малу ступінь вимірності (площина, циліндр тощо). Конвенціональні субтрактивні технології оброблення з ЧПК орієнтовані на оброблення з кількістю керованих координат 3–5. Часто такі технології застосовуються і для оброблення простих поверхонь або простих елементів, але ефективними вони є саме під час оброблення складних поверхонь. Якщо ж говорити про адитивні технології, то для їх застосування не існує обмежень складності форми, яку б не можна було виготовити з їх застосуванням. Причому, що характерно, для формоутворення вкрай складної форми достатньо по суті двокоординатної системи керування з періодичною подачею по третій координаті в ортогональній до двох перших площині.

Так чому ж для оброблення різанням складних поверхонь необхідне збільшення керованих координат, а для адитивних технологій – не потрібно? Відповідь криється саме в принципі формоутворення. Субтракція передбачає наявність інструменту, суттєво твердішого за оброблюваний матеріал, відповідним чином заточений для забезпечення умов різання, та й часто (за деякими винятками) такого, що обертається (останнє якраз потрібне для забезпечення процесу різання). Сам факт наявності такого інструменту, який має вісь обертання, визначає *умови доступу інструменту до оброблюваної поверхні* (так добре знайомі фахівцям з оброблення матеріалів різанням). Тут варто не забути і про фізичні явища, що супроводжують процес різання в його динамічному прояві, супроводжувані тертям, зношуванням тощо. Адитивні технології не мають зазначеного обмеження, адже самого інструменту не існує, а підхід побудови шарами визначає вільний доступ до всіх ділянок по суті плоскої поверхні й вільне нанесення матеріалу у потрібну зону. Саме тому на трикоординатному металорізальному верстаті з ЧПК обробити деталь типу «крильчатка» не можна, а на адитивній машині (3д-принтері) можна. Такі можливості адитивних технологій зумовили легкість реалізації екстремально складних форм, до яких належать форми після топологічної оптимізації та гратчасті структури.

*Топологічна оптимізація* – це «математичний метод, який оптимізує компоновання матеріалу в межах заданого простору проектування для заданого набору навантажень, граничних умов та обмежень з метою максимальної ефективності роботи системи» [5]. Така максимальна ефективність часто пов'язана з тим, що в межах заданого простору залишається лише той матеріал, який несе функціональне навантаження, тим самим конструкція наближається до конструкції рівної міцності. Приклад застосування топологічної оптимізації [6, с. 89] вказує на суттєву зміну структури собівартості виготовлення досліджуваної деталі порівняно з конвенціональною технологією виготовлення, в якій 95 % витрат приблизно в рівній пропорції приходяться на матеріал та експлуатацію адитивної машини, зі зведенням практично до нуля витрат на оплату праці робочого, складання, технологічне підготовлення виробництва. Це принциповий момент, який ми згадаємо дещо пізніше в частині аналізу економіки адитивного виробництва. Сумарні ж витрати на виготовлення вузла з використанням конвенціональних технологій і адитивних є майже однаковими.

*Гратчасті та трабекулярні структури.* Можливості ускладнення форми можуть бути реалізовані через конструювання гратчастих структур [7, с. 4], які забезпечують побудову надзвичайно легких та водночас міцних конструкцій з мінімальною витратою матеріалу. Зазначимо, що побудова таких конструкцій іншими методами неможлива, а сфера застосування може бути вкрай важливою з точки зору досягнення кінцевого результату, наприклад [3, с. 839]. Трабекулярні стохастичні структури можуть повторювати природню структуру будови живих істот, зокрема кісткової тканини [8]. Такі структури добре підходять для проектування біомедичних імплантів.

*Градентні матеріальні структури.* Мультиматеріальні адитивні технології [9, с. 160] дозволяють одночасно оперувати двома і більше матеріалами, наносячи їх протягом одного технологічного переходу. Це дозволяє створювати так звані градентні матеріальні структури, тобто по суті виріб буде мати змінні фізико-механічні властивості в межах однієї деталі. Можуть застосовуватися різні комбінації матеріалів: «провідник – ізолятор», «прозорий – не прозорий», «твердий – гнучкий», «колір 1 – колір 2» тощо, а застосовуючи їх у різних пропорціях по суті можна за визначеним законом формувати задані фізико-механічні властивості. Це ще одна відмінність, яку надає конструктору застосування таких технологій і матеріалів. Якщо використання конвенціональних технологій для оброблення матеріалів дозволяло конструктору змінювати характеристики міцності конструкції виключно за рахунок зміни форми, то використання мультиматеріальних адитивних технологій розширює ці можливості на зміну властивостей матеріалу.

*Проектування, орієнтоване на адитивні технології.* Проектування деталей під можливості адитивного виробництва потребує розроблення нових підходів, які наразі формуються під загальною назвою «проектування для адитивного виробництва» (англ. *DFAM, Design For Additive Manufacturing*) [10], яке є логічним розвитком методології складально орієнтованого проектування (англ. *DFA, Design For Assembly*) та процесно-орієнтованого проектування (англ. *DFM, Design For Manufacturing*). Якщо залишатися на традиційних підходах до проектування, то довгий час економічні аспекти застосування адитивних технологій будуть страждати. Один з базових принципів методології DFA полягає у намаганні об'єднати кілька деталей в одну, після чого оцінити економічні витрати за різними варіантами на весь технологічний процес виготовлення й складання. Те саме слід робити і у випадку практичного застосування адитивних технологій.

*Доступність і властивості матеріалів для адитивних технологій.* Переважна більшість сучасних адитивних технологій дає широкий вибір матеріалів. Такі матеріали можуть суттєво різнитись за фізико-механічними властивостями. Наприклад, GE Additive Comrany – один з лідерів у постачанні на світовий ринок обладнання і витратних матеріалів для адитивних технологій пропонує порошки на основі нержавіючої сталі, жароміцної сталі, інструментальної сталі, кобальт-хромові сплави, сплави на основі нікелю, сплави титану, сплави алюмінію тощо [11]. Фінальні фізико-механічні властивості є результатом цілого комплексу технологічних засобів – від підготовки матеріалу до адитивного процесу через умови його реалізації до постоброблення. В будь-якому випадку виріб, отриманий за допомогою адитивних технологій, має анізотропію фізико-механічних властивостей, аналогічно до того, як це відбувається з матеріалами при обробленні тиском. Провідні компанії, надаючи таблиці із характеристиками матеріалів, дають їх стосовно обладнання, на якому вони вирощуватимуться й подаються у різних напрямках (в площині побудови, перпендикулярно або ж під кутом до площини побудови) окремими цифрами. По деяких показниках різниця може бути в межах статистичної значущості, а по деяких може сягати значень, які потребують урахування на етапі проектування виробу з урахуванням того, як він буде зорієнтований при вирощуванні. Це ще одна особливість адитивних технологій, яку слід враховувати при проектуванні виробів, які виготовлятимуться на базі таких технологій.

*Економіка адитивних технологій.* Питання ефективності застосування адитивних технологій часто спирається на аргументи «обладнання дуже дороге», «матеріали дорогі», «виготовлені деталі дуже дорогі». Практичний досвід [3] свідчить, що вже сьогодні рішення, отримані на базі адитивних технологій, є ефективними. Правильний підхід до урахування всіх складових витрат, правильний підбір

технології і обладнання, застосування методології DFAM – запорука ефективності сучасного виробництва. Питання не є простим, адже тільки вибір адитивної технології та адитивної машини потребує урахування численних факторів, серед яких: вартість покупки комплексу; продуктивність машини; якість поверхні деталі; ступінь деталізації (здатність відтворювати дрібні фрагменти); точність побудови; трудомісткість постоброблення; стабільність модельного матеріалу; термін служби машини до заміни основних вузлів; вартість модельних (основних й допоміжних) матеріалів; надійність і строки постачання витратних матеріалів та запасних частин; розвиненість технічної підтримки в регіоні; вартість поточного обслуговування машини; вартість сервісного контракту у постгарантійний період; надійність і довговічність машини; ресурс основних вузлів до заміни або капітального ремонту; необхідна кваліфікація персоналу, а відтак і його вартість; вимоги і витрати на облаштування й підтримку інженерної інфраструктури тощо. Суттєва економія може бути отримана шляхом суттєвого зменшення частки операцій механічного оброблення. Зменшення ваги позитивно відобразиться на експлуатаційних властивостях виробів, для яких маса є критичною. Ускладнення оснастки для лиття підтиском шляхом додавання складних за формою внутрішніх каналів дозволить суттєво підвищити ефективність самої оснастки. Таких прикладів можна навести багато і з часом їх буде ставати все більше.

Привернемо увагу до «парадоксу адитивних технологій». Вище з посиланням на [6] вказувалося суттєва зміна структури витрат собівартості адитивних технологій порівняно з конвенціональними. Практично 95 % усіх витрат – це витрати на матеріал та час роботи машини. Якщо врахувати, що час роботи машини є лінійною функцією витрат матеріалу, то єдиним фактором, що впливає на собівартість, є вартість (кількість) витраченого матеріалу. Саме тому на рисунку 2 для адитивних технологій ми бачимо горизонтальну лінію, що свідчить про незалежність вартості від складності форми. Тому «парадокс» полягає у тому, чим складнішою стане форма деталі (за рахунок видалення тих областей матеріалу, які не є функціональними), тим дешевшою буде деталь у виготовленні. Жодна інша технологія не має такої залежності, тут чим складнішою є форма деталі, тим більшими будуть витрати на її виготовлення. Тому місце і роль адитивних технологій у системі виробничих технологій – це проектування деталей і виробів екстремально складної форми, що забезпечує функції деталей і виробів за мінімальної кількості матеріалу. Розуміння цієї принципової особливості є важливим для розуміння місця й обмежень адитивних технологій у загальній системі промислових технологій.

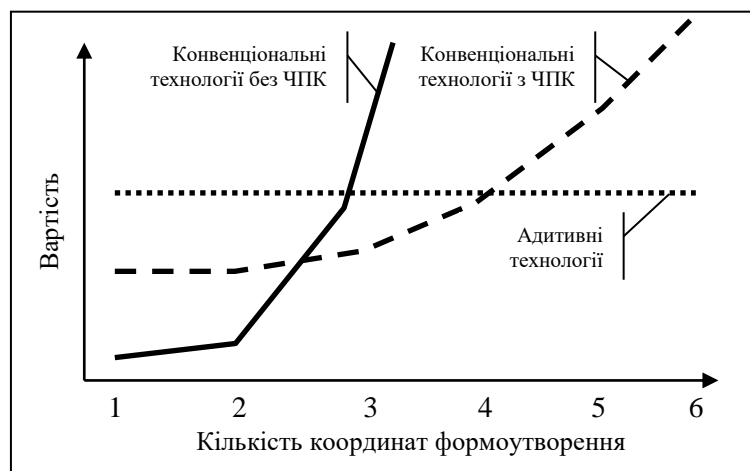


Рис. 2. Порівняльна вартість реалізації технологій

*Напрями ефективного застосування адитивних технологій в машинобудуванні.* Високотехнологічне наукоємне машинобудування, авіація і космонавтика, продукція оборонно-промислового комплексу є пріоритетними сферами застосування адитивних технологій. Основні тренди, що спостерігаються тут: новітні матеріали для адитивних технологій; суттєве скорочення кількості деталей у складних виробках (іноді у декілька разів); суттєве ускладнення форми деталей та структур, що лежать в їх основі для суттєвого підвищення їх функціоналу. Складні канали для ефективного нагрівання або охолодження, гратчасті регулярні й стохастичні структури, скорочення строків виготовлення й радикальне зниження витрат на технологічну оснастку. На черзі виробництва, в яких сотні верстатів з ЧПК будуть замінені десятками комплексів: адитивна машина + високоточний металорізальний верстат з ЧПК, з відповідним зниженням вимог до виробничих площ, кваліфікації виробничого персоналу, зменшення відходів виробництва й зниження його енергоємності.

*Напрями ефективного застосування адитивних технологій у біомедичній інженерії.* Біомедична інженерія сьогодні є ще однією галуззю, яка є активним споживачем можливостей передових адитивних

технологій. Індивідуальна форма штучного ендопротезу, виготовленого в рекордно короткі строки, полегшена для досягнення відповідності ваги штучного імпланту із системою кріплення до відповідності масі замінного живого фрагмента, спроектована з використанням трабекулярних структур, – все це створює нову якість медичної відповіді на захворювання, нову якість життя людини. Сучасні досягнення застосування адитивних технологій у спроектованих С.В. Бурбурською й виготовлених індивідуальних біомедичних імплантатах Лабораторії біомедичної інженерії Інституту травматології та ортопедії НАМН України представлені на ресурсі [12].

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Передові адитивні технології забезпечують використання широкого спектра доступних матеріалів з добре прогнозованими фізико-механічними властивостями, надають безпрецедентні можливості щодо формоутворення, вже сьогодні є достатньо ефективними з економічної точки зору. Недооцінювання ролі адитивних технологій може призвести до втрат існуючих ринків збуту продукції через зниження її конкурентоспроможності, але головне – до неможливості створення принципово нової продукції. У вже цитованому джерелі [2] вказується, що «... здатність обробляти матеріали адитивним способом суттєво змінить цілі галузі й дозволить виробляти нові вироби, які не можна буде виготовити із застосуванням конвенціональних технологій. Це буде тривалий і глибокий вплив на виробництво й розподілення продукту, й відтак, на суспільство в цілому». Вплив на високотехнологічні галузі машинобудування буде не меншим, ніж вплив технологій механічного оброблення на верстатах з ЧПК, а імовірно – більшим. І станеться це не через 50 років. Революційні можливості надають адитивні технології для виготовлення індивідуальних імплантів, що якісно змінить життя людей. Цей процес вже розпочався, і, найімовірніше, вже протягом найближчих 5–10 років відбудеться докорінні зміни в частині поширення й поглиблення застосування адитивних технологій у наукоємному машинобудуванні та біомедичній інженерії.

#### Список використаної літератури:

1. Пасічник В.А. Стан і перспективи адитивного виробництва / В.А. Пасічник // Резание и инструмент в технологических системах : Межд. научн.-техн. сб. Харьков, НТУ «ХПИ». – 2018. – Вып. 89 (101). – С. 134–140 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez\\_89\\_2018.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez_89_2018.pdf).
2. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. – 2nd ed. / I.Gibson, D.Rosen, B.Stucker. – Springer, 2015. – 510 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
3. Badiru A. Additive Manufacturing Handbook / by A.B. Badiru, V.V. Valencia, D.Liu (ed.) // Product Development for the Defense Industry. – CRC Press, 2017. – 931 p.
4. Design and Engineering Assurance for the Customized Implants Production Using Additive Technologies / V.Pasichnyk, M.Kryvenko, S.Burburska, O.Haluzynskyi // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021, pp. 81–94. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7\_9.
5. Topological optimization [Electronic resource]. – Access mode : [https://en.wikipedia.org/wiki/Topology\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization).
6. Galjaard S. New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing / S.Galjaard, S.Hofman, S.Ren // In Advances in Architectural Geometry. – 2015. – pp. 79–93. DOI: 10.1007/978-3-319-11418-7\_6.
7. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges / T.Maconachie, M.Leary, B.Lozanovski et al. // Material Design. – 2019. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
8. Alabort E. Design of metallic bone by additive manufacturing / E.Alabort, D.Barba, R.C. Reed // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 164. – pp. 110–114. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.01.022.
9. Han D. Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications / D.Han, H.Lee // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28. – pp. 158–166. DOI: 10.1016/j.coche.2020.03.004.
10. Plocher J. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures / J.Plocher, A.Panesar // Material Design. – 2019. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108164.
11. GE Additive. Powder [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.ge.com/additive/powders-overview>.
12. 3D Lab [Electronic resource]. – Access mode : <https://3dlab.in.ua/>.

#### References:

1. Pasichnyk, V.A. (2018), *Stan i perspektyvy adytyvnogo vyrobnyctva Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh*, Mezhd. nauchn.-tekh. sb. NTU «KhPI», Khar'kov, Issue 89 (101), pp. 134–140, [Online], available at: [http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez\\_89\\_2018.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez_89_2018.pdf)
2. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015), *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed., Springer, 510 p., doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
3. Badiru, A., Valencia, V.V. and Liu, D. (ed.) (2017), *Additive Manufacturing Handbook*, Product Development for the Defense Industry, CRC Press, 931 p.
4. Pasichnyk, V., Kryvenko, M., Burburska, S., Haluzynskyi, O. (2021), «Design and Engineering Assurance for the Customized Implants Production Using Additive Technologies», *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 81–94. doi: 10.1007/978-3-030-77719-7\_9.

5. Topological optimization, [Online], available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Topology\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization)
6. Galjaard, S., Hofman, S. and Ren, S. (2015), «New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing», *In Advances in Architectural Geometry*, pp. 79–93. doi: 10.1007/978-3-319-11418-7\_6
7. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B. et al. (2019), «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges», *Material Design*, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
8. Alabort, E., Barba, D. and Reed, R.C. (2019), «Design of metallic bone by additive manufacturing», *Scripta Materialia*, Vol. 164, pp. 110–114, doi: 10.1016/j.scriptamat.2019.01.022.
9. Han, D. and Lee, H. (2020), «Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications», *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 158–166, doi: 10.1016/j.coche.2020.03.004.
10. Plocher, J. and Panesar, A. (2019), «Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures», *Material Design*, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108164.
11. GE Additive. Powder, [Online], available at: <https://www.ge.com/additive/powders-overview>
12. 3D Lab, [Online], available at: <https://3dlab.in.ua/>

**Бурбурська** Світлана Валеріївна – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», головний інженер Лабораторії біомедичної інженерії Інституту травматології та ортопедії НАМН України.

Наукові інтереси:

- комп’ютерно-інтегровані технології проектування індивідуальних кастомних ендопротезів та індивідуальної медичної оснастки;
- технологічна підготовка й індивідуальне виробництво кастомних ендопротезів на базі адитивних технологій.

**Пасічник** Віталій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- комп’ютерно-інтегровані технології проектування в машинобудуванні та біомедичній інженерії;
- адитивні технології та їх застосування в машинобудуванні та біомедичній інженерії;
- методологія складально-орієнтованого проектування та проектування для адитивних технологій виробів машинобудування та біомедичної інженерії.

**Burburska S.V., Pasichnyk V.A.**

**Opportunities of additive technologies in the manufacture of high-tech products of mechanical engineering and biomedical engineering**

Additive technologies are relatively new for the field of mechanical engineering, but they are extremely relevant and promising. Understanding the possibilities of such technologies and determining their place among established technologies is an important task today. The article analyzes the place of additive technologies, their capabilities in terms of shaping, creating extremely complex parts with a developed internal structure and surface structures. The possibilities provided by multi-material additive technologies are considered. The reasons for the paradoxical property of additive technologies to be invariant for the complexity of details are explained. The main opportunities and trends in the use of additive technologies in the design and manufacture of high-tech parts in mechanical engineering and biomedical engineering are analyzed.

**Keywords:** additive technologies; 3D printing; high technologies; mechanical engineering; biomedical engineering.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2021.