

Р. В. КРИВОБОК, О. С. РЯБІНІН, О. С. РИЩЕНКО, А. А. ВОРОНКІН, В. В. ЛЕБЕДЄВ

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІКИ: СТВОРЕННЯ АЛЮМОСИЛКАТНИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ ТА ВПЛИВ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ НА ГАЛУЗЬ

У статті розглянуто сучасні тенденції у виробництві кераміки при створенні алюмосилкатних керамічних виробів за допомогою 3D-друку або аддитивного виробництва. Кераміка є матеріалом з високою продуктивністю, оскільки вона має тверді, механічно-міцні властивості, відмінну стійкість до зношування, а також високий температурний і корозійний опір. Також розглянуто традиційні методи виробництва кераміки, які складаються з трьох етапів: підготовки матеріалу, формування (може бути виконане за допомогою різних методів, таких як ізостатичне пресування, пресування під тиском, лиття під тиском, стрічкове лиття, гелеве лиття, відливання суспензії та ін.) та спікання. Технологія 3D-друку – це ефективний та перспективний метод виробництва, який продовжує розвиватися і знаходити нові застосування в різних галузях: медична, хімічна, біохімічна, екологічна, технічна, радіотехнічна промисловості та ін. Нові дослідження і розробки дозволяють вдосконалювати якість і точність друку, а також розширювати можливості використання керамічних матеріалів. Особливе значення надано перевагам використання 3D-друку для виготовлення керамічних виробів, зокрема можливості створювати індивідуальний дизайн продукції та досягати потрібної форми, складу, мікроструктури і властивостей. Використання технології 3D-друку також допомагає зменшити відходи та знизити витрати на матеріали, що робить виробничий процес більш екологічним та економічно вигідним. В цілому, стаття надає відомості про актуальні напрямки у виробництві кераміки та вплив інноваційних методів на цю галузь промисловості. Проаналізовано переваги та перспективи використання 3D-друку для створення керамічних виробів, а також надано огляд матеріалів та методів, які використовуються в цьому процесі. Крім того, у статті розглянуто матеріали, які застосовуються в технології 3D-друку, що можуть бути класифіковані в залежності від їх придатності до обраного методу виготовлення або за типом матеріалу.

Ключові слова: 3D-друк, аддитивне виробництво, космічна техніка, технічна кераміка, оксидна кераміка, методи виробництва, технології виробництва.

R. V. KRYVOBOK, O. S. RIABININ, O. S. RYSHCHENKO, A. A. VORONKIN, V. V. LEBEDEV

CONTEMPORARY TRENDS IN CERAMIC PRODUCTION: CREATION OF ALUMINOSILICATE PRODUCTS USING 3D PRINTING AND THE IMPACT OF INNOVATIVE APPROACHES ON THE INDUSTRY

The article discusses modern trends in the production of ceramics in the creation of aluminosilicate ceramic products using 3D printing or additive manufacturing. Ceramic is a high-performance material because it has hard, mechanically strong properties, excellent wear resistance, and high temperature and corrosion resistance. Traditional methods of ceramic production are also considered, which consist of three stages: material preparation, molding (can be performed using various methods, such as isostatic pressing, pressure pressing, pressure casting, tape casting, gel casting, suspension casting, etc.) and sintering. 3D printing technology is an effective and promising production method that continues to develop and find new applications in various fields: medical, chemical, biochemical, environmental, technical, radio engineering, etc. New research and development allow to improve the quality and accuracy of printing, as well as to expand the possibilities of using ceramic materials. Special importance is given to the advantages of using 3D printing for the manufacture of ceramic products, in particular, the ability to create an individual product design and achieve the desired shape, composition, microstructure and properties. The use of 3D printing technology also helps to reduce waste and lower material costs, making the production process more environmentally friendly and cost-effective. In general, the article provides information about current directions in the production of ceramics and the impact of innovative methods on this branch of industry. The advantages and prospects of using 3D printing to create ceramic products are analyzed, and an overview of the materials and methods used in this process is provided. In addition, the article discusses the materials used in 3D printing technology, which can be classified depending on their suitability for the chosen manufacturing method or by the type of material.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, space technology, technical ceramics, oxide ceramics, production methods, manufacturing technologies.

Вступ.

Протягом останніх років, в різних галузях виробництва, почала активно використовуватись сучасна технологія 3D-друку, яка до того ж відома як аддитивне виробництво (АВ). Ця інноваційна виробнича технологія впливає на загальноприйняті методи виробництва різноманітних видів продукції, враховуючи також і виготовлення кераміки. Тому, вона може використовуватись для створення складних керамічних структур, які за допомогою традиційних методів виробництва неможливо або дуже складно виготовити. Можливості технології 3D-друку для створення складних форм роблять її ідеальним вибором у виробництві функціональних складників різних областей, таких наприклад, як: хімічна, біохімічна, екологічна, технічна, радіотехнічна промисловості та ін.

Основна перевага технології 3D-друку полягає у можливості створення особливого дизайну продукції, а також здатність досягти необхідної форми, складу, мікроструктури та потрібних властивостей. Матеріали, виготовлені за технологією 3D-друку мають високу міцність та твердість, що робить їх універсальними у використанні. Крім того, вони мають відмінну термічну та хімічну стійкість, а також задовільні оптичні, електричні та магнітні властивості [1]. Це дозволяє здійснити пристосування продукції під певні вимоги та потреби, що насамперед необхідно та важливо в галузях, де кожен компонент може мати виняткові особливості. Завдяки своїй високій міцності та стійкості, кераміка є ідеальним матеріалом для різноманітних сфер застосування, зокрема автомобільної, матеріалів для елементів конструкцій космічної техніки, медичної та електронної промисловості. Завдяки властивостям

кераміки, вибір цього матеріалу дає можливість створювати високотехнологічні вироби, які здатні витримувати екстремальні умови та вимоги сучасних технологій, а не лише виготовлення деталей і компонентів. Тому створення керамічних виробів з використанням 3D-друку є однією з найновітніших інновацій у цій галузі [2].

До недавнього часу, виробництво складних керамічних деталей обмежувалося через брак необхідних технологій. Однак, у результаті використання технологій аддитивного виробництва, відкриваються нові можливості для створення складних керамічних структур, які можуть задовольнити різноманітні вимоги галузі кераміки.

Крім того, використання 3D-друку зменшує кількість відходів, що утворюються під час виробництва, оскільки матеріал використовується більш ефективно, і зменшує витрати матеріалів для створення геометрії виробів. До того ж, ця технологія сприяє збереженню ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

Загалом, 3D-друк є продуктивним і перспективним методом виробництва, який продовжить модернізуватись та відкривати нові можливості використання в різних індустріях.

Ця стаття пропонує детальніше ознайомитися з процесом виготовлення алюмосилікатних керамічних виробів за допомогою 3D-друку, а також розгляне переваги та перспективи використання цієї технології.

Аналіз досліджені і публікацій.

З розвитком технологій, інформація про 3D-друк була обмеженою, і тому технологія аддитивного виробництва вважалася специфічною, доступною лише для окремих спеціалістів. Але за останні роки ситуація суттєво зазнала змін. Аддитивне виробництво продовжує розвивати різні сфери промисловості і одним з найбільш перспективних напрямків застосування цієї технології є кераміка. Зростання потреби та розповсюдження 3D-друку у багатьох сферах виробництва, модернізація технологій та зниження вартості обладнання, зробили цю технологію більш доступною для широкого кола користувачів. Технологія 3D-друку використовується не лише в промисловості, але і в освіті, медицині, архітектурі та навіть у побуті, тому що однією з головних переваг 3D-друку кераміки – це можливість створення складних геометричних форм, які складно виготовити традиційними методами виробництва, що дозволяє дизайнерам і інженерам реалізовувати свої ідеї та створювати унікальні продукти, які відповідають високим стандартам якості та естетики.

3D-друк кераміки почав динамічно розвиватися і набирати популярність приблизно з середини 2010-х років (рис. 1) [3] і цей процес був обумовлений кількома ключовими факторами.

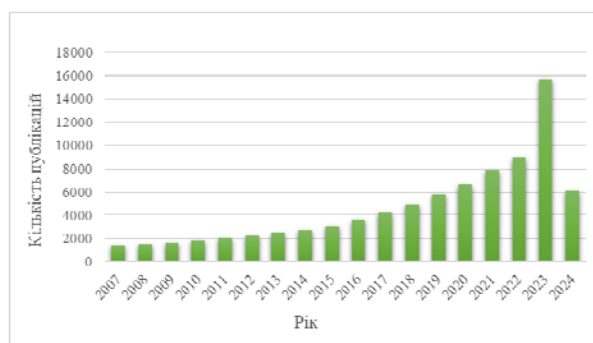


Рис. 1 – Розвиток 3D-друку кераміки по роках

Перш за все, технологічний прогрес став вирішальним фактором у розвитку 3D-друку кераміки. Нові технології і матеріали дозволили створювати більш точні і якісні керамічні вироби. У даному випадку, розробка спеціальних керамічних суспензій і паст, які можна використовувати в 3D-принтерах, значно покращила якість друку [4].

В різних областях, наприклад, медицина, архітектура, дизайн, виробництво – попит до створення керамічних виробів, виготовлених за допомогою 3D-друку почав зростати, що допомогло вдосконаленню цієї технології. За допомогою технології 3D-друку кераміки в архітектурі, є можливість для виробництва складних та незвичайних елементів, щоб створювати інноваційні дизайнерські рішення та архітектурні конструювання. У медицині, за допомогою 3D-друку кераміки, виготовляються керамічні імплантати, які адаптуються під конкретні потреби пацієнта, що в подальшому призводить до значного покращення результатів лікування.

Наукові дослідження та інноваційні рішення також відіграли важливу роль у впровадженні 3D-друку кераміки. Науковими центрами, дослідницькими лабораторіями, компаніями та університетами, почалось активне дослідження можливостей технології 3D-друку кераміки, що надало змогу науковцям зробити значну кількість публікацій наукових праць та патентів (рис. 2).

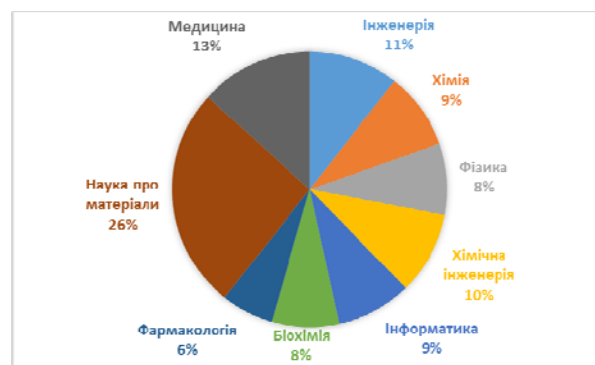


Рис. 2 – Документи за різними напрямками наукових досліджень

Ці дослідження дозволили розробити нові методи і матеріали для 3D-друку кераміки, а також вивчити їх властивості і застосування. Таким чином, дослідження в галузі матеріалознавства дозволили створити керамічні матеріали з покращеними механічними і фізичними властивостями, що розширило можливості їх використання.

Використання інноваційних технологій також підштовхнуло до еволюції 3D-друку кераміки. Поява комерційних 3D-принтерів, на яких можна друкувати керамічні матеріали, зробила цю технологію більш доступною для широкого кола користувачів, що стимулює розвиток креативних та інноваційних проєктів. Крім того, зростання конкуренції на ринку 3D-принтерів, призвело до зниження їх вартості, що також зробило цю технологію доступною для малого та середнього бізнесу, сприяючи їхньому розвитку.

Одним з перших значних досягнень у цій галузі стало створення 3D-принтерів, які могли друкувати керамічні матеріали з високою точністю й якістю. В тому числі, в індустрії ювелірного виробництва, 3D-друк кераміки дає змогу створювати особливі та складні вироби без недосконалих граней або країв. Поверхні виробів мають високий ступінь гладкості та відмінну текстуру без деформацій або дефектів лиття [5].

Інформація про 3D друк кераміки постійно зростає, оскільки технологія продовжує розвиватися і знаходити нові застосування в різних галузях. Нові дослідження і розробки дозволяють покращувати якість і точність друку, а також розширювати можливості використання керамічних матеріалів. Таким чином, використання технології 3D-друку кераміки має великий потенціал для подальшого розвитку, оскільки цей вид діяльності стає все більш популярним та перспективним.

До того ж, 3D-друк кераміки дозволяє виробляти вироби малими партіями, що робить цю технологію особливо привабливою для виробництва ексклюзивних та персоналізованих виробів.

Ще однією важливою перевагою 3D-друку кераміки є можливість використання різних матеріалів, включаючи біосумісні та біорозкладні матеріали. Це також відкриває нові можливості для створення біомедичних виробів, таких як керамічні каркаси для регенерації кісткової тканини. Такі каркаси можуть бути виготовлені з матеріалів, які мають хорошу біосумісність та біорозкладність, що робить їх придатними для використання в медицині.

Через збільшення онлайн-ресурсів, таких як блоги, форуми та відео-тutorіали, користувачі мають можливість ділитись досвідом та знаннями у виробництві даної технології, що дозволяє швидше освоїти цю технологію та почати застосовувати її у різних галузях виробництва. Новачки також можуть швидше освоїти технологію 3D-друку кераміки через соціальні мережі та онлайн-спільноти, що стають платформами для обміну ідеями та проєктами. Також важливо відзначити, що розвиток програмного забезпечення для 3D-моделювання та дизайну робить

процес створення моделей більш доступним та інтуїтивно зрозумілим. Це дозволяє навіть недосвідченим користувачам виготовляти складні та функціональні вироби.

Дослідниками [6] відзначено, що програмне забезпечення відіграє ключову роль у 3D-друку глини та інших матеріалів. Як і багато інших машин для цифрового виробництва, 3D-принтери для глини використовують .gcode файли, які можуть бути згенеровані за допомогою комерційних слайсерів, таких як Cura або Simplify3D, або шляхом написання коду безпосередньо.

Їх лабораторія віддає перевагу написанню власного gcode за допомогою Grasshopper і Python, що дозволяє розширювати можливості 3D-друку в глині та підтримувати друк унікальних матеріалів, таких як бронза і скло, але лише обмежений спектр геометрій можна друкувати на 3D-принтері з глиною, якщо використовувати комерційно доступне програмне забезпечення для слайсингу.

Тому авторами розроблено спеціалізовані програмні рішення WeaveSlicer і TRAVel Slicer для розширення друкованих геометрій, які значно розширюють можливості 3D-друку. WeaveSlicer дозволяє друкувати геометрії з постійною товщиною стінки, генеруючи коливний шлях, що особливо корисно для глиняних скульптур. TRAVel Slicer, в свою чергу, створює неперервні спіральні шляхи для матеріалів з нелінійною реологією, таких як бронзова глина і скляна паста, що мінімізує затримки та забезпечує більш чисті друки. Ці ресурси дають можливість успішно друкувати складні та унікальні форми, які неможливо було б реалізувати за допомогою традиційного програмного забезпечення.

У цілому, революція технології 3D-друку в області кераміки відкриває нові горизонти для інновацій та розвитку. Вона дозволяє створювати унікальні та високоякісні вироби, які відповідають високим стандартам якості та естетики, а також задовольняють індивідуальні потреби кожного споживача.

Застосування 3D-друку в космічній галузі.

Адитивні технології, пов'язані з пошаровим нарощуванням і синтезом об'єктів за допомогою комп'ютерних 3D-технологій, сьогодні виходять на перший план при створенні космічного обладнання. На думку вчених, 3D-друк може значно прискорити освоєння позаземного простору.

Як і в інших галузях промисловості, 3D друк може спростити виробництво багатьох деталей космічних апаратів, усуваючи потребу в інструментах, тим самим значно зменшуючи витрати на деталь – особливо для невеликих за обсягом і нестандартних деталей, необхідних для ракет. Але відмова від інструментів може також скоротити час виготовлення, що допоможе ще більше знизити витрати і прискорити польотні цикли. Наприклад, Space Shuttle пройшов шлях від концепції до першого польоту трохи більше дев'яти років. Для порівняння, каліфорнійська компанія Relativity Space, що

базується в Каліфорнії, може надрукувати цілу ракету всього за 60 днів, використовуючи адитивне виробництво.

Але не лише нові деталі можуть отримати вигоду від 3D друк. Оскільки багаторазові ракети швидко стають нормою для космічних запусків, попит на запасні та змінні частини збільшився. Маючи можливість швидко та економічно ефективно виготовляти ці деталі, адитивне виробництво може допомогти продовжити термін служби цих ракет та їхніх двигунів, ще більше знижуючи витрати та скорочуючи час ремонту. Забезпечуючи швидше відновлення ракет та інших транспортних засобів, адитивне виробництво може забезпечити більшу кількість запусків, що сприятиме впровадженню більшої кількості готових рішень для космічних польотів [29].

Але 3D друк деталей для дослідження космосу – це не лише земна діяльність. Протягом багатьох років NASA та інші космічні агентства друкують полімерні деталі на Міжнародній космічній станції.

Окрім підтвердження концепції, що деталі можна друкувати в умовах мікрогравітації, дослідження підкреслюють одну з ключових переваг адитивного виробництва для майбутніх космічних досліджень - придатність до вторинної переробки. Надаючи можливість не лише виготовляти більшість деталей чи інструментів, які можуть знадобитися астронавтам, але й багаторазово переробляти ці деталі, 3D-друк може звільнити астронавтів від необхідності передбачати кожен деталь чи інструмент, які можуть знадобитися їм під час місії. Натомість, у космос потрібно буде брати лише сировину [29].

Застосування 3D-друку кераміки в галузі кісткової інженерії.

Тканинна інженерія, яка поєднує біологію, інженерію та медицину, ефективно використовує 3D-друк для створення кісткових каркасів. Лікування кісткових дефектів завжди було складною задачею в ортопедії, тому каркаси, як важливий компонент інженерії кісткової тканини, виготовлені за допомогою технології 3D-друку, пропонують значні переваги в дослідженні та лікуванні клінічних кісткових дефектів.

Нанокompatитні каркаси, створені за допомогою 3D-друку, показують сприятливі результати в преклінічних дослідженнях. Ці каркаси можуть включати остеокондуктивну матрицю, остеоіндуктивні білки та остеогенні клітини, що сприяє росту нової кісткової тканини. Однією з ключових проблем в ортопедичній хірургії є лікування затриманого зрощення, неправильного зрощення та взагалі незрощення кісток. Для вирішення цієї проблеми використовуються різні методи, включаючи кісткову трансплантацію та заміники кісткової тканини. Автори [7] зосереджені в огляді сучасних кісткових трансплантатів і їх заміників, що використовуються в клінічній практиці ортопедичної хірургії, а також

розглядаються переваги та недоліки різних технологій створення композитних каркасів, властивості керамік і полімерів.

Тканинна інженерія кісток є міждисциплінарною областю, в якій розробляються нові методи, враховуючи метод 3D-друку, для лікування пацієнтів з кістковими пошкодженнями або захворюваннями. Основна мета тканинної інженерії кісток – відновлення пошкоджених кісток за допомогою унікальних нанотехнологічних методів. Людська тверда тканина (кістка) є однією з найважливіших структур людського тіла, забезпечуючи підтримку, захист і функціональність. Пошкодження кісток може бути результатом віку, дегенеративних захворювань або нещасних випадків. Заміна кісток включає імплантацію нової кістки або відповідної заміни між місцями пошкодженої твердої тканини (кістки) або втраченої твердої тканини (кістки) для підтримки процесу загоєння. Методи лікування цих пошкоджень, які існують, часто виявляються неефективними, оскільки вони залежать від аутотрансплантатів, аллотрансплантатів і біоміметичних або різних штучних ресурсів і підходів. Аутотрансплантати, хоча і вважаються стандартом для кісткової трансплантації, мають обмеження через можливі захворювання донора, створення інших терапевтичних труднощів і низьку доступність тканин. Ефективність заміника імплантата сильно залежить від середовища розриву або дефекту твердої тканини (кістки). Це обмежує використання імплантата, будь то невеликий наповнювач або великий наповнювач, який діє як каркас, що сприяє формуванню нової кістки. Вибір заміника імплантата, який задовольняє цим умовам, і одна або кілька стратегічних правил кісткового загоєння (остеокондукція, остеоіндукція і остеогенез) не є вичерпними. Принаймні, конструкція імплантата повинна бути остеокондуктивною в своєму середовищі, щоб використовуватися як невеликі наповнювачі, що сприяють формуванню нових кісткових клітин.

Включення факторів росту, таких як костні морфогенетичні білки (BMPs), допомагає клітинам рости, і остеоіндуктивне середовище може бути додано до імплантата для стимулювання ще більш швидкого загоєння. Постійне з'явлення нових революційних або покращених матеріалів для імплантації зберігає область твердої тканини (кістки) як захоплюючу можливість для майбутніх досліджень, спрямованих на подолання цих прогалів у створенні структури імплантата, яка відповідає вимогам адекватної тимчасової кісткової структури.

Протези з металів і кісткового цементу, полімерів і кераміки є додатковими варіантами лікування. Тканинна інженерія може бути розділена на різні підходи. Основний метод створення міцних тканинних (наприклад, кісткових і хрящових) заміників полягає в поєднанні живих клітин, природно активних молекул і тимчасових тривимірних (3D) пористих каркасів.

Використовуючи цей метод, тканинна інженерія створює тверду тканину (кістку) з розсіяних клітин, які можуть перетворюватися в остеобласти на високопористих біоматеріалах.

В останні десятиліття виробництво частин тіла, твердих (кісток) і м'яких тканин стало багатообіцяючою альтернативою для лікування або заміни втрати тканин і органів, викликаних інфекцією або болем. Найбільш досліджений метод включає використання синтетичного позаклітинного матриксу (каркасу), зазвичай призначеного для тимчасового використання і, отже, виготовленого з біорозкладних або біодеградуруючих полімерів. Тканинна інженерія привернула увагу до виробництва пористих структур для підтримки регенерації тканин.

Виробництво твердої тканини (кістки) може вирішити багато проблем, таких як бактеріальна інфекція, нестача донорів, висока вартість і повільна васкуляризація (розширення, відновлення звужених або перекритих кровоносних судин). Відновлення кісток є основною метою тканинної інженерії кісток. Воно може бути корисним у терапевтичних або репаративних цілях при широкому спектрі кісткових дефектів. Як зазначено вище, тканинна інженерія кісток вимагає трьох основних компонентів: клітинних апаратів позаклітинного матриксу (каркасу) і факторів росту.

Згідно з останнім звітом про світовий ринок ортопедичних трансплантатів і виробництва матеріалів, загальний ринок ортопедичних трансплантатів і пристроїв зростає зі середньорічного темпу зростання (CAGR) майже на 8,8% протягом наступного десятиліття, щоб досягти близько 91,42 мільярда доларів до 2025 року. Ортопедичні трансплантати зростають з темпом 7-10% за останнє десятиліття, і очікується, що цей ріст продовжиться в найближчі роки.

Успіх виробництва частин тіла, м'яких і твердих тканин каркасів врешті-решт залежатиме від того, чи зможе він витримати прикріплення клітини, ріст і, врешті-решт, поділ клітин у відповідну структуру. Тому біорозкладний каркас повинен бути біосумісним і мати проникний зв'язок для створення неформальної васкуляризації та швидкого росту нової структури [7].

В залежності від використовуваних матеріалів, 3D-друковані каркаси можна класифікувати на два типи: однокомпонентні каркаси та композитні каркаси. Однокомпонентні каркаси включають п'ять класифікацій: металеві біоматеріальні каркаси (медичні імплантати), керамічні каркаси (біопротези для заміни кісток), VAG-каркаси (біоактивне скло, яке зв'язується з кістковою та м'якими тканинами), полімерні каркаси (натуральні та синтетичні полімери для кісткової тканини) та нановолоконні каркаси (покращує біосумісність і сприяє адгезії каркасу з кістковою тканиною). Композитні каркаси, в свою чергу, можна розділити на сім категорій: РММА кісткові цементні каркаси (висока міцність на стиск, зручність обробки, біосумісність та візуалізація), СРС кісткові цементні каркаси (хороша пластичність і

заповнення складних кісткових дефектів), полімерні каркаси (органічні сполуки), желатинові каркаси (висока водорозчинність, низька імуногенність, висока гістосумісність і низька вартість), PLA-каркаси (композити, допоміжні матеріали), PCL-каркаси (мають високу біосумісність та біорозкладність, що робить їх придатними для використання як основного матеріалу в каркасах для інженерії кісткової тканини) та PLGA-каркаси (біорозкладне органічне сполучення, що складається з двох мономерів – молочної кислоти та гліколевої кислоти) [8].

Видалення пухлин, деформації, спортивні травми та інфекції можуть призвести до кісткових дефектів. У Сполучених Штатах щорічно реєструється понад 6,5 мільйонів випадків кісткових дефектів. Найбільш поширеним методом лікування кісткових дефектів є кісткова трансплантація. По всьому світу щорічно виконується два мільйони кісткових трансплантацій.

Авторами [9] досліджено виготовлення кісткових каркасів з біосумісних матеріалів, таких як фосфат кальцію та його похідні, що служать тимчасовою основою для росту нової кісткової тканини. Передові технології 3D-друку дозволяють створювати складні, специфічні для пацієнта геометрії, що імітують природну кісткову структуру. Основна мета таких каркасів – це забезпечення механічної підтримки та направлення росту клітин, сприяючи регенерації кісткової тканини.

Порівняно з класичними методами регенерації та ремонту кісток, кісткові каркаси за 3D-технологією мають переваги. По-перше, технологія 3D-друку дозволяє точно налаштувати кісткові каркаси у відповідності до конкретних анатомічних потреб пацієнта. Для забезпечення кращої підгонки та вирівнювання, цифровий дизайн можна модифікувати під розмір, форму та структуру дефекту або відсутньої кістки. По-друге, за допомогою 3D-друку можна створювати високо складні та комплексні структури, які відтворюють природну будову кістки. Це включає інтеграцію пористих структур, взаємозв'язаних каналів та специфічних поверхневих характеристик, які можуть полегшити прикріплення клітин, дифузю поживних речовин та васкуляризацію. По-третє, за допомогою 3D-друку кісткові каркаси можуть бути створені відповідно до унікальних вимог пацієнта. Цей підхід збільшує ефективність відновлення кісток та мінімізує ймовірність ускладнень, оскільки він пристосований під індивідуальні потреби, а також підвищує результативність терапії.

Сталий розвиток та екологічні проблеми стають все більш актуальними, оскільки світ стикається з серйозними екологічними проблемами. Загострення екологічних проблем, таких як забруднення повітря, викиди токсичних речовин у водні та ґрунтові системи, втрата біорізноманіття, а також виснаження природних ресурсів лише посилюється через швидкий ріст людського населення та впливу економічної

діяльності на навколишнє середовище. Тому, для створення інженерії тканин та біоматеріалів використовуються відновлювані та перероблені відходи, що є одним із перспективних напрямків. Цей напрямок показує значний потенціал для вирішення проблем, пов'язаних з дефіцитом природних ресурсів та збільшенням обсягу відходів.

Одним із способів врахування сталості при розробці біоматеріалів є використання натуральних полімерів. Ці матеріали є одним із найбільш стійких типів біоматеріалів завдяки їх достатку, здатності до самовідновлення та можливості переробки відходів для повторного використання. Виділяють використання полісахаридів (целюлоза, бактеріальна целюлоза, альгінат та хітин з ракоподібних), натуральних волокон з бамбуку та кокосу, а також білків (морський колаген, шовковий фіброїн та перероблений кератин) для досліджень натуральних полімерів та їх композитів інженерії кісткових тканин [10].

Тому, адитивне виробництво (3D-друк) стійке завдяки своїй адитивній природі та має потенціал для забезпечення замкнутого циклу поставок для виробництва медичних пристроїв, таких як ортопедичні імплантати, які також адаптовані під конкретного пацієнта. Хоча адитивне виробництво не є технологією без відходів, вона генерує менше відходів порівняно з багатьма іншими традиційними процесами. Також, відновлювані матеріали та різні типи відходів можуть перероблятися для того, щоб зменшити вплив промислової діяльності на навколишнє середовище та зменшити залежність населення від первинних матеріальних ресурсів. Перетворення відходів у біоматеріали для інженерії кісткової тканини є добре встановленою практикою. Водночас використання перероблених металів у виготовленні біоматеріалів знаходиться в зародковому стані. Адитивне виготовлення біоматеріалів з відновлюваних та перероблених ресурсів лише нещодавно почало вводиться у виробництво [10].

Біоактивне скло традиційно синтезувалося з використанням високотемпературної техніки плавлення, але з розвитком хімії золь-гель технології, стало можливим отримання різних складів біоактивного скла, що містять до 90 мол.% SiO_2 . Це дозволило використовувати біоактивне скло як резервуар іонів, таких як Ca, Mg, Cu, Zn та Ag, а також рідкоземельних металів для терапевтичних іонів. Тим не менш, потрібні індивідуальні елементи та зміни при дефектах кісток та травмах. Таким чином, тривимірний 3D-друк композитів біоактивних стеклов має потенціал для надання індивідуальних кісткових імплантатів. Синтетичні полімери, такі як полілактидна кислота (PLA), полі(лактид-ко-гліколева кислота) (PLGA), полівініловий спирт (PVA), полікапролактон (PCL), полі(гідроксибутират-ко-гідроксивалерат) (PHBV) та акрилонітрил-бутадієн-стирол, використувалися для виготовлення біомедичних кісткових імплантатів. Серед цих

полімерів імплантати на основі PLGA, PCL, PLA та акрилонітрил-бутадієн-стиролу досягли стадії клінічних випробувань. PLA, PLGA та PCL навіть отримали схвалення FDA США як матеріали для 3D-друку біомедичних імплантатів.

Натуральні полімери, такі як колаген, желатин, шовковий фібрин та фібрин, а також полісахариди, такі як хітозан та альгінат, використовуються в комбінації з біоактивним склом для поліпшення біологічних та механічних властивостей. Наприклад, колаген забезпечує нативну позаклітинну матрицю для кісткових клітин, а хітозан поліпшує механічні та біологічні властивості біоматеріалів. Дослідниками показано, що 3D-друковані композитні каркаси з біоактивного скла продемонстрували сприятливі результати в преклінічних дослідженнях та мають великий потенціал у клінічному застосуванні в найближчому майбутньому. Основною перевагою композитів біоактивного скла є їх високі механічні властивості та біологічні остеогенні властивості. Однак вибір полімерів повинен ґрунтуватися на їхньому застосуванні або області кістки, що потребує заміни. Розробка та оптимізація формулювання грають ключову роль у розробці імплантатів [11,12].

3D-друк на основі гідрогелів став інноваційною технологією в біомедичних дослідженнях, особливо в таких галузях, як тканинна інженерія, регенеративна медицина, загоєння ран і персоналізована медицина [13-16]. Завдяки можливості створення каркасів з високою точністю та специфічними властивостями для кожного пацієнта, ця технологія надає нові можливості в терапії, зокрема в напрямку персоналізованих рішень [17]. Використання тривимірних друкованих каркасів дозволяє не лише ранню діагностику захворювань через моделювання *in vitro*, але й кастомізацію лікування та оптимальне дозування з контрольованими профілями вивільнення, які ефективно адаптуються до потреб окремої людини [18]. Екструзійний 3D-друк, як одна з найрозвиненіших технік, дозволяє створювати гідрогелеві каркаси зі складною геометрією, що відкриває нові перспективи в біомедичних застосуваннях [19].

Одним з важливих аспектів створення гідрогелевих каркасів є вибір біоматеріальних чорнил, які повинні відповідати певним реологічним вимогам для стабільного друку та збереження структури після нього [20]. Природні полімери, зокрема з рослинних джерел, стають популярнішими завдяки своїй біосумісності, відновлюваності та низькій імуногенності [20]. Наприклад, використання натрію альгінату в поєднанні з желатином покращує адгезію клітин та забезпечує контрольоване гелювання при низьких температурах [20]. Додаткове включення наноматеріалів, таких як мезопористі наночастинки кремнезему (MSNs), дозволяє значно покращити механічні властивості та біоактивність гідрогелів [21-24]. MSNs мають високу пористість, велику питому поверхню та легкість функціоналізації, що робить їх ефективними носіями для молекулярної візуалізації,

доставки ліків та білків, а також контрольованого вивільнення біологічних агентів залежно від їх ізоелектричної точки [25-33].

Таким чином, поєднання 3D-друку з інноваційними біоматеріалами та нанокompозитами відкриває нові шляхи для розробки персоналізованих та ефективних медичних рішень. Використання різних типів полімерів і наночастинок у композиції гідрогелів дозволяє створювати матеріали з необхідними механічними, біологічними та терапевтичними властивостями, що відповідають індивідуальним потребам пацієнтів [34-35].

Таким чином, технологія 3D-друку відкриває нові можливості для створення кісткових каркасів, які можуть значно покращити процес регенерації кісток. Використання біосумісних матеріалів (фосфат кальцію, біоактивне скло, нанокompозити) дає можливість для виготовлення складних, індивідуальних форм для пацієнта, що сприяють росту клітин та механічній підтримці. Стійкість матеріалів та використання відновлюваних ресурсів також відіграють важливу роль у розвитку цієї галузі.

Матеріали та методи створення сучасних керамічних виробів з використанням 3D-друку.

Кераміка вважається матеріалом з високою продуктивністю, завдяки своїм твердим, механічно-міцним властивостям, відмінній стійкості проти зношування, температурному і корозійному опору. Керамічні матеріали з особливими властивостями широко застосовуються в різних сучасних галузях промисловості, включаючи енергетику, авіацію, оборонну техніку, хімічну промисловість, а також в мехатроніці та біомедичних дослідженнях. Кераміка є ключовим компонентом для розробки нових технологій та продуктів, що відповідають високим стандартам вимог сучасного світу.

Виробництво керамічних виробів за допомогою традиційних методів складається з трьох етапів: підготовки матеріалу, формування (який є найбільш трудомістким) та спікання. Формування кераміки може бути виконане за допомогою різних методів, таких як ізостатичне пресування, пресування під тиском, лиття під тиском, стрічкове лиття, гелеве лиття, відливання суспензії та ін. [1, 2]. Хоча технологічний процес кожного з цих методів може відрізнятися, більшість з них вимагає використання форм. Це обмежує можливості виготовлення складних компонентів, оскільки форми мають прості геометричні форми. Крім того, обробка матеріалів може бути складною через крихкість кераміки.

Матеріали, які використовуються в технологіях аддитивного виробництва чи 3D-друку, можуть бути класифіковані в залежності від їх придатності до обраного методу виготовлення (наприклад, порошки, волокна, дріт, рідина, лист та суспензії) або за типом матеріалу (наприклад, метали, полімери та кераміка). Вибір матеріалу для виробництва залежить від конкретного призначення продукту. При цьому матеріал повинен мати відповідні фізичні властивості та забезпечувати необхідну механічну міцність після

обробки, яку можна вдосконалити під час подальшої обробки [1, 36].

На сьогоднішній день все більше уваги приділяється розробці технічної кераміки, оскільки вона має широкий спектр застосувань у різних галузях промисловості.

Модернізована (вдосконалена) кераміка, ще відома як «тонка» або «технічна» кераміка – це керамічні матеріали, що мають такі властивості: висока міцність, жорсткість, стійкість до зношування, хімічна інертність, теплостійкість та ін. Ці матеріали виготовляються з високоякісних сировинних матеріалів, таких як оксиди, карбіди, нітриди та бориди металів, а також неметалевих сполук: кремнію, оксид алюмінію, карбід кремнію, нітрид кремнію та інші.

Тонка, технічна кераміка знайшла широке застосування в різних галузях промисловості, включаючи авіакосмічну, автомобільну, електронну, медичну та хімічну промисловість. Ці матеріали використовуються для виготовлення компонентів двигунів, турбін, насосів, підшипників, електронних плат, сенсорів, медичних імплантатів та інших високотехнологічних виробів.

Однією з головних переваг тонкої, технічної кераміки є її здатність працювати в екстремальних умовах, таких як високі температури, високий тиск, агресивні середовища та інші важкі умови експлуатації. Ці матеріали також мають низький коефіцієнт теплового розширення, що дозволяє їм зберігати стабільну геометрію при зміні температури [37, 38].

Технічну кераміку, відповідно до її хімічної природи, класифікують на оксиди металів, такі як оксид алюмінію (Al_2O_3) і цирконій (ZrO_2), або на неоксиди, такі як карбіди, нітриди або бориди. Ці високоєфективні керамічні матеріали можуть бути класифіковані залежно від їхнього призначення на конструкційну кераміку, електрокераміку (з діелектричними, п'єзоелектричними та піроелектричними властивостями), оптокераміку, кераміку для хімічної обробки, керамічні покриття, біокераміку та сверхпровідники.

Серед оксидних керамік, які найчастіше досліджуються для аддитивного виробництва, варто відзначити Al_2O_3 за його універсальністю, доступною ціною та низькою температурою спікання, а також ZrO_2 за високу ударостійкість, низьку температуру спікання та широке використання в промисловості. Хоча кремній (SiO_2) та силікатна кераміка іноді не розглядаються як технічні керамічні матеріали, їх включено в цей огляд через їх широке використання у декількох наукових групах як економічна альтернатива оксиду алюмінію та іншим сучасним керамічним матеріалам на початкових етапах. Неоксидні керамічні матеріали, такі як карбід кремнію (SiC), карбід вольфраму (WC), карбід бору (B_4C), нітрид кремнію (Si_3N_4), нітрид алюмінію (AlN) і диборид цирконію (ZrB_2), зазвичай відзначаються

вищою термостійкістю, а також підвищеною міцністю та мають опір до руйнування (рис. 3).



Рис. 3 – Схема класифікації керамічних матеріалів, які використовуються в аддитивному виробництві

Більше того, якщо оксидну кераміку можна досить легко обробляти (температура спікання зазвичай не перевищує близько 1550 °C), обробка неоксидної кераміки виявляється набагато складнішою через її вищу твердість; температура спікання, як правило, значно перевищує 1700 °C [37, 39].

Керамічні матеріали застосовуються у різних методах аддитивного виробництва, таких як екструзія, струменева обробка з використанням зв'язуючих речовин та направлене енерговиділення. Ці технології дозволяють створювати складні керамічні конструкції шляхом послідовного нанесення матеріалу та його обробки. Проте методи, які ґрунтуються на екструзії, є найбільш популярними завдяки доступності виготовлення обладнання для цих процесів, що робить їх економічно вигідними. Такі технології здебільшого використовуються в виробництві через свою простоту та ефективність, дозволяючи швидко та ефективно виготовляти керамічні вироби різної складності. Додатково, цей метод дозволяє використовувати різноманітні матеріали, а втрати матеріалу під час виробництва є незначними. Це робить екструзію привабливим вибором для виготовлення керамічних виробів з урахуванням ефективного використання матеріалів та зниження витрат. Процеси виробництва керамічних виробів за допомогою екструзії включають різні методи, такі як нанесення кераміки шляхом плавлення, формування керамічних виробів за допомогою екструзії для отримання різних форм, автоматизоване лиття, використання 3D-друку з термопластами та екструзійне виготовлення в замороженій формі. Ці методи надають можливість створювати керамічні вироби з різноманітною геометрією та властивостями, що розширює можливості їх використання у різних галузях, включаючи промисловість, будівництво та медицину.

Методи екструзійного виробництва кераміки також включають лиття під тиском, пресування під тиском, стрічкове лиття та гелеве лиття. Ці технології виробництва дозволяють створювати більш складні

геометричні форми, ніж традиційні методи виробництва кераміки. Проте, витрати на виробництво можуть бути вищими у порівнянні з іншими методами, оскільки для їх застосування може знадобитися високоякісне обладнання. Тим не менш, вони відкривають широкі можливості для створення високоякісних керамічних виробів з різноманітними властивостями [40, 41].

Аддитивне виробництво керамічних матеріалів дає можливість забезпечення більшої гнучкості у формуванні та дизайні.

Технології 3D-друку кераміки.

Залежно від методу попередньої підготовки матеріалів, технологію 3D-друку керамічних матеріалів можна класифікувати у трьох категоріях: рідкі, порошкові та тверді матеріали.

Технологія, що базується на суспензії (slurry-based), передбачає використання суспензії в якості вихідного матеріалу, яка складається з твердих частинок, розміщених у рідині. У випадку кераміки, суспензія може містити керамічні частинки, розміщені у водній або неводній рідині. Ця технологія часто використовується в таких процесах, як стереолітографія (SLA) та мультиджетний друк (MJP), для виготовлення керамічних виробів. Суспензія повинна бути ретельно диспергована в рідині з використанням необхідних поверхнево-активних речовин та добавок, щоб забезпечити рівномірне розподілення частинок та запобігти їх осіданню. Після цього суспензія може бути використана для формування шарів за допомогою різних технологій друку, а потім піддається подальшій обробці, такій як піроліз та спікання, для отримання кінцевого керамічного виробу [42, 43].

Технологія, що базується на енергії (power-based), передбачає використання джерела енергії для виготовлення виробів [44]. У контексті виробництва кераміки, ця технологія може включати в себе такі методи, як селективне лазерне спікання (SLS) та електронно-променева плавка (EBM) [45, 46].

У SLS порошок кераміки розсипається тонким шаром на платформі, а лазер високої потужності селективно спікає порошок, утворюючи твердий шар. Цей процес повторюється шарозашарово, поки не буде створена вся деталь.

У EBM використовується електронний промінь для плавлення порошку кераміки. Цей процес відбувається в вакуумі, що дозволяє досягти високої щільності та міцності виробу.

Обидва методи дозволяють виготовляти вироби з високою точністю та складною геометрією, але SLS зазвичай використовується для виробництва прототипів та дрібносерійної продукції, тоді як EBM – для виготовлення великогабаритних виробів з високими вимогами до міцності та щільності [47-50].

Технологія, що базується на об'ємних твердих матеріалах (bulk solid-based), передбачає використання твердих матеріалів у вигляді блоків, пластин або інших об'ємних форм для виготовлення

виробів. У контексті виробництва кераміки, ця технологія може включати такі методи, як фрезерування, токарна обробка та стругальна обробка.

У фрезеруванні використовується фрезерний станок для вирізання матеріалу з об'ємної заготовки. Цей процес може бути виконаний з використанням різних типів фрез, таких як плоскі, круглі або сферичні, для створення різних форм та геометрій.

У токарній обробці використовується токарний верстат для обробки заготовки, що обертається, за допомогою різців. Цей процес може бути використаний для створення циліндричних, конічних та інших обертових форм.

У стругальній обробці використовується стругальний верстат для обробки поверхні заготовки за допомогою стругального інструменту. Цей процес може бути використаний для створення плоских, фаскових та інших поверхонь [51].

Об'ємні тверді матеріали, що використовуються в цій технології, можуть бути керамічними, металевими або полімерними, в залежності від потрібних властивостей виробу. Ця технологія дозволяє виготовляти вироби з високою точністю та складною геометрією, але може бути менш ефективною, ніж інші методи виробництва, такі як 3D-друк, для виготовлення великої кількості однакових виробів [1, 52].

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Протягом останнього часу, наукові дослідження та промислові потреби зробили кераміку новітньою областю для впровадження технологій 3D-друку. У даному огляді проведено аналіз інформації про технології 3D-друку та асортимент матеріалів, які застосовуються для створення керамічних виробів. Завдяки технологіям 3D-друку, керамічні компоненти з надзвичайно складною та універсальною структурою тепер можуть бути реалізовані у різних галузях, що було неможливим при виготовленні традиційними методами. Це демонструє високий потенціал застосування технології 3D-друку та актуальність цього інноваційного підходу.

Технологія 3D-друку представляє собою складний процес, що включає ряд етапів підготовки до виготовлення кінцевих керамічних виробів. Отже, властивості остаточних деталей також повинні відповідати вимогам, які визначаються складом та мікроструктурою, що формуються з використанням певних матеріалів і процесу спікання.

Але, незважаючи на великі досягнення у виборі відповідних керамічних матеріалів та оптимізації процесів обробки та після обробки, існують перешкоди для більш широкого застосування 3D-друку в керамічному виробництві.

Для того щоб розширити сферу застосування 3D-друку в керамічній промисловості та досягти значного впливу на виробництво якісних технічних керамічних деталей у великих масштабах, необхідно акцентувати

майбутні досягнення в цій області на розвитку матеріалів та оптимізації процесів. Особлива увага повинна бути приділена вдосконаленню методів формування, що дозволять виготовляти високоєфективні керамічні компоненти з мінімальними витратами матеріалу та часу.

Список літератури

1. Chen Z., Li Z., Li J., Liu C., Lao C., Fu Y., Liu C., Li Y., Wang P., He Y. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39, No. 4. pp. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013.
2. Romanczuk-Ruszk E., Sztorch B., Pakuła D., Gabriel E., Nowak K., Przekop R. 3D Printing Ceramics – Materials for Direct Extrusion Process. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, No. 1. pp. 364–385. doi: 10.3390/ceramics6010022.
3. Google Scholar. URL: <https://scholar.google.com.ua/scholar> (accessed 01.08.2024).
4. del-Mazo-Barbara L., Ginebra M.-P. Rheological characterisation of ceramic inks for 3D direct ink writing: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. pp. 18–33. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.08.031.
5. Zhang G., Wang J., Li J., Zhou X., Zhou Y. Research on Key Technologies of Jewelry Design and Manufacturing Based on 3D Printing Technology. *Coatings*. 2024. Vol. 14, No. 6. pp. 1–11. doi: 10.3390/coatings14060701.
6. Bell F., Friedman-Gerlicz C., Gould J., McClure E., Gelosi D., Bustos A., Silva Lovato M., Suina J., Buechley L. Demonstrating New Materials, Software, and Hardware from the Hand and Machine Lab. *Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24)*. Conference Paper, Honolulu, HI, USA (11–16 May 2024). doi: 10.1145/3613905.3648647.
7. Mahmood S.K., Abdul Razak I., Yasee M.T., Yusof L.M., Mahmood Z.K., Gimba F.I., Zakaria Z.B. 3-D nanocomposite scaffolds: Tissue engineering for bone reconstruction. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*. 2022. Vol. 36, No. 2. pp. 433–444. doi: 10.33899/ijvs.2021.130481.1831.
8. Dong J., Ding H., Wang Q., Wang L. A 3D-Printed Scaffold for Repairing Bone Defects. *Polymers*. 2024, Vol. 16, No. 706. pp. 1–34. doi: 10.3390/polym16050706.
9. Farnaz Darghiasi S., Farazin A., Sadat Ghazali H. Design of bone scaffolds with calcium phosphate and its derivatives by 3D printing: A review. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2024. Vol. 151. doi: 10.1016/j.jmbbm.2024.106391.
10. Putra N. E., Zhou J., Zadpoor A. A. Sustainable Sources of Raw Materials for Additive Manufacturing of Bone-Substituting Biomaterials. *Advanced Healthcare Materials*. 2024. Vol. 13. pp. 1–18. doi: 10.1002/adhm.202301837.
11. Dukle A., Murugan D., Nathanael A.J., Rangasamy L., Oh T.-H. Can 3D-Printed Bioactive Glasses Be the

- Future of Bone Tissue Engineering? *Polymers*. 2022. Vol. 14. pp. 1–20. doi: 10.3390/polym14081627.
12. Hassan M., Dave K., Chandrawati R., Dehghani F., Gomes V. G. 3D printing of biopolymer nanocomposites for tissue engineering: Nanomaterials, processing and structure-function relation. *European Polymer Journal*. 2019. Vol. 121. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109340.
13. He Y., Yang F., Zhao H., Gao Q., Xia B., Fu J. Research on the printability of hydrogels in 3D bioprinting. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. p. 29977. doi: 10.1038/srep29977.
14. Derby B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds. *Science*. 2012. Vol. 338. No. 6109. pp. 921–926. doi: 10.1126/science.1226340
15. Murphy S.V., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*. 2014. Vol. 32. No. 8. pp. 773–785. doi: 10.1038/nbt.2958.
16. Fonseca K.B., Maia F.R., Cruz F.A., Andrade D., Juliano M.A., Granja P.L., Barrias C.C. Influence of RGD density on cell adhesion, proliferation, and migration in RGD-functionalized alginate hydrogels. *Soft Matter*. 2013. Vol. 9. No. 13. pp. 3283–3292. doi: 10.1039/c3sm27560d.
17. Liu X., Peng W., Wang Y., Zhu M., Sun T., Peng X., Wang J. Synthesis of an RGD-grafted oxidized sodium alginate–N-succinyl chitosan hydrogel and an in vitro study of endothelial and osteogenic differentiation. *Journal of Materials Chemistry B*. 2013. Vol. 1. No. 22. pp. 4484–4492. doi: 10.1039/C3TB20552E
18. Young S., Wong M., Tabata Y., Mikos A.G. Gelatin as a delivery vehicle for the controlled release of bioactive molecules. *Journal of Controlled Release*. 2005. Vol. 109. No. 1–3. pp. 256–274. doi: 10.1016/j.jconrel.2005.09.023.
19. Ma S., Zheng X., Zhang C., Wang H., Li H. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2015, Springer, Cham
20. Advincula R.C., Dizon J.R.C., Caldon E.B., et al. On the progress of 3D-printed hydrogels for tissue engineering. *MRS Communications*. 2021. Vol. 11. pp. 539–553. doi: 10.1557/s43579-021-00069-1
21. Barrett-Catton E., Ross M.L., Asuri P. Multifunctional hydrogel nanocomposites for biomedical applications. *Polymers*. 2021. Vol. 13. p. 856. doi: 10.3390/polym13060856.
22. Manzano M., Vallet-Regí M. Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. p. 1902634. doi: 10.1002/adfm.201902634.
23. Watermann A., Brieger J. Mesoporous silica nanoparticles as drug delivery vehicles in cancer. *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. p. 189. doi: 10.3390/nano7070189.
24. Hosseinpour L., Walsh L.J., Xu C. Biomedical application of mesoporous silica nanoparticles as delivery systems: a biological safety perspective. *Journal of Materials Chemistry B*. 2020. Vol. 8. p. 9863. doi: 10.1039/D0TB01868F.
25. Karaman D.S., Desai D., Senthilkumar R., et al. Shape engineering vs organic modification of inorganic nanoparticles as a tool for enhancing cellular internalization. *Nanoscale Research Letters*. 2012. Vol. 7. p. 358. doi: 10.1186/1556-276X-7-358.
26. Rahmani S., Budimir J., Sejalon M., Daurat M., Aggad D., Vives E., Raehm L., Garcia M., Lichon L., Gary-Bobo M., et al. Large pore mesoporous silica and organosilica nanoparticles for Pepstatin A delivery in breast cancer cells. *Molecules*. 2019. Vol. 24. p. 332. doi: 10.3390/molecules24020332.
28. Xia T., Kovochich M., Liong M., Meng H., Kabehie S., George S., Zink J.I., Nel A.E. Polyethyleneimine coating enhances the cellular uptake of mesoporous silica nanoparticles and allows safe delivery of siRNA and DNA constructs. *ACS Nano*. 2009. Vol. 3. No. 10. pp. 3273–3286. doi: 10.1021/nn900918w
29. Kao K.-Y., Lo S.-C., Chen H.-L., Chen J.-H., Chen S.-A. Self-assembly and photophysical properties of conjugated polymer nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B*. 2014. Vol. 118. No. 49. pp. 14510–14518. doi: 10.1021/jp508775b
30. Saikia D., Deka J.R., Wu C.-E., Yang Y.-C., Kao H.-M. pH responsive selective protein adsorption by carboxylic acid functionalized large pore mesoporous silica nanoparticles SBA-1. *Materials Science and Engineering: C*. 2019. Vol. 94. pp. 232–241. doi: 10.1016/j.msec.2018.09.043
31. Kwon D., Cha B.G., Cho Y., Min J., Park E.-B., Kang S.-J., Kim J. Extra-large pore mesoporous silica nanoparticles for directing in vivo M2 macrophage polarization by delivering IL-4. *Nano Letters*. 2017. Vol. 17. No. 5. pp. 2747–2756. doi: 10.1021/acs.nanolett.6b04130.
32. Xu C., He Y., Li Z., Ahmad Nor Y., Ye Q. Nanoengineered hollow mesoporous silica nanoparticles for the delivery of antimicrobial proteins into biofilms. *Journal of Materials Chemistry B*. 2018. Vol. 6. pp. 1899–1902. doi: 10.1039/C7TB03201C
33. Tu J., Boyle A.L., Friedrich H., Bomans P.H.H., Bussmann J., Sommerdijk N.A.J.M., Jiskoot W., Kros A. Mesoporous silica nanoparticles with large pores for the encapsulation and release of proteins. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. No. 47. pp. 32211–32219. doi: 10.1021/acsami.6b11324.
34. Zengin A., Castro J.P.O., Habibovic P., van Rijt S.H. Injectable, self-healing mesoporous silica nanocomposite hydrogels with improved mechanical properties. *Nanoscale*. 2021. Vol. 13. pp. 1144–1154. doi: 10.1039/D0NR07406C.
35. Piantanida E., Boškoski I., Quero G., Gallo C., Zhang Y., Fiorillo C., Arena V., Costamagna G., Perretta S., De Cola L. Nanocomposite hyaluronic acid-based hydrogel for the treatment of esophageal fistulas. *Materials Today Bio*. 2021. Vol. 10. p. 100109. doi: 10.1016/j.mtbio.2021.100109.
36. Bourell D., Kruth J., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A., Clare A. Materials for additive manufacturing.

- CIRP Annals*. 2017. Vol. 66, No. 2. pp. 659–681. doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
37. Lakhdar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 116. pp. 1–50. doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100736.
38. Iyasara A., Odewale I., Nwabine E., Osonwa N., Azubuike T., Amaakaven V. Understanding Ceramic Science and Technology beyond Clay. *International Journal of Information, Engineering & Technolog*. 2023. Vol. 12, No. 3. pp. 17–24. doi: 42721454381232.
39. Bhatia A., Sehgal A. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 81, No. 2. pp. 1060–1067. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.379.
40. Sun D., Lu Y., Karaki T. Review of the applications of 3D printing technology in the field of piezoelectric ceramics. *Resources Chemicals and Materials*. 2023. Vol. 2, No. 2. pp. 128–142. doi: 10.1016/j.recmm.2023.02.001.
41. Budharaju H., Suresh S., Sekar M., De Vega B., Sethuraman S., Sundaramurthi D., Kalaskar D. Ceramic materials for 3D printing of biomimetic bone scaffolds – Current state-of-the-art & future perspectives. *Materials & Design*. 2023. Vol. 231. pp. 1–30. doi: 10.1016/j.matdes.2023.112064.
42. Liu J., Zhu R., Zhang T., Wang X., Tang Y. Fabrication and properties of SiO₂/SiO₂ composite ceramic based on stereolithography technology. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2024. Vol. 12, No. 2. pp. 141–150. doi: 10.1080/21870764.2024.2324526.
43. Qu P., Liang G., Hamza M., Mo Y., Jiang L., Luo X., Liu Z., Liu C., Lou Y., Chen Z. 3D printing of high-purity complex SiC structures based on stereolithography. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, No. 13. pp. 23763–23774. doi: 10.1016/j.ceramint.2024.04.100.
44. McAleer E., Alazzawi M., Haber R., Akdoğan E. Effect of resin composition on cure depth, dimensional accuracy, and surface roughness in Al₂O₃ stereolithographic 3D printing. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*. 2024. Vol. 6, No. 3. pp. 1–12. doi: 10.1002/ces2.10212.
45. Diao Q., Zeng Y., Chen J. The Applications and Latest Progress of Ceramic 3D Printing. *Additive Manufacturing Frontiers*. 2024. Vol. 3, No. 1. pp. 1–24. doi: 10.1016/j.amf.2024.200113.
46. Jin F., Li Q., Yang K., Qiu Y., Fan J., Liu X., Liang J., Zhou Y., Li J. Optimisation and application of high solid loading stereolithography 3D printing ceramic cores slurry. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, No. 2. pp. 3574–3583. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.11.107.
47. Романенко В.В., Хайдуров В.В. Аналіз сучасних технологій адитивного виробництва // The 3rd International scientific and practical conference «European congress of scientific achievements», 2024. Barcelona, Spain. 2024. pp. 82–88.
48. Kısasöz B., Tütük İ., Koç E., Karabeyoğlu S., Kısasöz A. Investigation of wear behavior of PA 12 matrix ceramic reinforced composites produced by selective laser sintering method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2024. pp. 1029–1035. doi: 10.17341/gazimmfd.1207967.
49. Song Y., Ghafari Y., Asefnejad A., Toghraie D. An overview of selective laser sintering 3D printing technology for biomedical and sports device applications: Processes, materials, and applications. *Optics & Laser Technology*. 2024. Vol. 171. doi: 10.1016/j.optlastec.2023.110459.
50. Villa A., Gianchandani P., Baino F. Sustainable Approaches for the Additive Manufacturing of Ceramic Materials. *Ceramics*. 2024. Vol. 7, No. 1. pp. 291–309. doi: 10.3390/ceramics7010019.
51. Patel A., Taufik M. Extrusion-Based Technology in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024. Vol. 49. pp. 1309–1342. doi: 10.1007/s13369-022-07539-1
52. J Myerberg The New Space Race: How 3D Printing Is Driving Current And Future Space Exploration 2022.

Відомості про авторів / About the Authors

Кривобок Руслан Вікторович (Krivobok Ruslan) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач науково-дослідною частиною Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: krivobok491@gmail.com

Рябінін Олександр Сергійович (Riabinin Oleksandr) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4460-4133>; e-mail: Oleksandr.Riabinin@ihti.khpi.edu.ua

Рищенко Олександр Сергійович (Ryshchenko Oleksandr) – кандидат технічних наук, завідувач НДВ НТНЦ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9008-2279>; e-mail: oleksandr.ryshchenko@khpi.edu.ua

Лебедєв Володимир Володимирович (Lebedev Vladimir) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6934-2349>; e-mail: vladimirlebedev1980@ukr.net

Воронкін Андрій Анатолійович (Voronkin Andrii) – доктор філософії, асистент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8893-4400>; e-mail: andrii.voronkin@khpi.edu.ua