

Гурин П. О.¹, Біда В. І.¹, Васильєв М. О.²

¹ Національний університет охорони здоров'я імені П. Л. Шупика, м. Київ, Україна

² Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ, Україна

3D-друк в ортопедичній стоматології

(огляд літератури)

▷ **Вступ.** Зубне протезування є одним із найважливіших напрямів стоматології, який пов'язаний із заміщенням втраченого зуба/зубів за допомогою штучних стоматологічних засобів. Щоб розв'язувати проблеми з традиційним процесом лиття та закритого штампування, наразі 3D-друк вважається новим кандидатом на виготовлення індивідуальних стоматологічних виробів, що привертає все більшу увагу в усьому світі. Усі витратні матеріали для 3D-друку в стоматології поділяються на полімерні матеріали, фотополімерні смоли, кераміку та метали. Переваги 3D-друку включають виготовлення бажаних протезів і моделей із найменшою кількістю матеріалу та можливість створювати кілька виробів одночасно. За допомогою 3D-принтера у стоматології виготовляють: хірургічні шаблони для імплантації, бюгельні протези, коронки, імпланти, моделі щелеп для демонстрації, вироби з гіпсу, форми для лиття зубів, тонкі воскові моделі, зубні зліпки, мостоподібні протези; зліпки часткових протезів, ортодонтичні зліпки та апарати, стоматологічні моделі, конструкції для ортодонції.

Мета: на підставі ретельного аналізу літературних джерел вивчити основні методи 3D-друку в ортопедичній стоматології, як частини цифрових технологій у медицині.

Матеріали та методи. Інформаційний пошук та аналіз наукових джерел проведено із використанням наукометричних баз *Web of Science*, *PubMed*, *Google Scholar*, *ScienceDirect.com* (Science, health and medical journals), *ResearchGate* за останні роки.

Висновок. Аналіз даних літератури останніх років показав велику зацікавленість стоматологів у розвитку та застосуванні для зубного протезування методів 3D друку, які показали суттєві переваги у порівнянні з традиційними технологіями.

Ключові слова: ортопедична стоматологія, зубні протези, адитивні технології, 3D друк, полімери, метали, кераміка.

Вступ

Цифрова стоматологія — це термін, що використовується для опису різних модальностей робочого процесу стоматологічного лікування, які здебільшого виконуються з використанням цифрових технологій. Кілька цифрових методів були включені у стоматологічну практику, щоб замінити звичайні методи та техніки, для покращення планування лікування та передбачуваності виконання [1].

Останніми роками спостерігається розширення сфери тривимірного (3D) друку, також відомого як адитивне виробництво (AM), яке є технологією виготовлення, за якої тривимірний твердий об'єкт (частини, деталі) будується пошарово, точково або рядково за допомогою програмного забезпечення автоматизованого проектування (CAD). Цей спо-

сіб кардинально відрізняється від традиційних способів виготовлення виробів, за яких з вихідної заготовки видаляється частина матеріалу [2–4]. Перший крок до комерціалізації AM пов'язаний із патентом Чака Халла, який заснував компанію у 1984 році [5].

Використання методу 3D-друку для різних матеріалів дозволяє компаніям в аерокосмічній, автомобільній, оборонній та медичній промисловості виготовляти деталі зі складною геометрією, неможливою для традиційних методів виробництва, зокрема фрезерування, зварювання, лиття, формування, кування та токарної обробки. Внесок цієї технології у загальну медицину, яка почалася в 1990-х роках із виробництва 3D-моделей, удосконалення діагностики та планування операцій, а також зниження хірургічних ризиків [6–8]. Зокрема, у сфері ортопедичної

хірургії застосування 3D-друку для синтезу індивідуальних каркасів із метою регенерації кісток є, мабуть, найважливішим використанням [9–10].

Застосування 3D-друку

Зубне протезування є одним із найважливіших напрямів стоматології, який пов'язаний із заміщенням втраченого зуба/зубів за допомогою штучних стоматологічних засобів. Щоб розв'язувати проблеми з традиційним процесом лиття та закритого штампування, наразі 3D-друк вважається новим кандидатом на виготовлення індивідуальних стоматологічних виробів, що привертає все більшу увагу в усьому світі [11–15]. Усі витратні матеріали для 3D-друку у стоматології поділяються на полімерні матеріали, фотополімерні смоли, кераміку та метали [16].

Поширення 3D-друку в стоматології відбувалося паралельно з вдосконаленими методами візуалізації, такими як конусно-променева комп'ютерна томографія і магнітно-резонансна томографія для планування та друку стоматологічних протезів із метою відновлення та заміни втрачених структур [17]. З іншого боку, переваги 3D-друку включають виготовлення бажаних протезів і моделей з найменшою кількістю матеріалу та можливість створювати кілька виробів одночасно [18].

За допомогою 3D-принтера у стоматології виготовляють: хірургічні шаблони для імплантації, бюгельні протези, коронки, імпланти, моделі щелеп для демонстрації, вироби з гіпсу, форми для лиття зубів, тонкі воскові моделі, зубні зліпки, мостоподібні протези; зліпки часткових протезів, ортодонтичні зліпки та апарати, стоматологічні моделі, конструкції для ортодонції [19].

На відміну від традиційних виробів, надруковані на 3D-принтері штучні зуби та зубні імпланти стали більш доступними завдяки швидкому виготовленню з високою точністю та індивідуальним налаштуванням. Крім того, 3D-друк, розроблений для стоматологічних застосувань, тепер може допомогти стоматологам надавати пацієнтам більш персоналізоване обслуговування за значно нижчою ціною, а також спростити складні робочі процеси щодо виробництва стоматологічних пристроїв. Зараз попит на 3D-друк у стоматологічній промисловості зріс завдяки прогресу технологій, що дає змогу стоматологам виконувати стоматологічні процедури із високою точністю, високою ефективністю

та мінімальною травмою для пацієнтів. Щоб збільшити ефективність виробництва зубних протезів, підвищити якість виготовлення зубних протезів і скоротити час лікування, дослідження, пов'язані з 3D-друком у стоматології, стали актуальною проблемою для вчених у країні та за кордоном. На відміну від традиційних методів або субтрактивного виробництва, ця технологія зменшує людські помилки, знос інструментів і втрати матеріалу без збільшення часу виробництва [20–27].

Стоматологічні матеріали у технології 3D-друку

Полімери. Враховуючи вимоги до нетоксичного, біосумісного та інертного матеріалу, діапазон матеріалів, доступних для використання в 3D-друкованих реставраціях зубів, обмежений. Сьогодні всі витратні матеріали для 3D-друку в стоматології можна розділити на такі типи матеріалів: полімери, фотополімерні смоли, кераміка та метали [28–32]. Нині більшість матеріалів для 3D-друку, які використовуються для реставрації зубів, є матеріалами на основі полімерів, що базується на їхніх поверхневих характеристиках, механічних і біологічних властивостях, простоті обробки та доступній вартості [33]. Специфічні застосування полімерів охоплюють майже всі галузі стоматології, включаючи прямі реставраційні процедури, протезування, ортодонцію та навіть імплантологію, оскільки синтетичний полієфіретеркетон (PEEK) нещодавно був запропонований як матеріал для імплантів [34, 35]. Індивідуальні полімерні протези обличчя з детальною морфологією можна легко отримати за допомогою 3D-друку. Полімери також використовувалися для виготовлення каркасів, що відіграють роль у регенерації кісткових структур, дентиноподібних і пульпоподібних тканин, мембран для спрямованої регенерації тканин, а також як системи доставляння ліків у лікуванні численних патологій ротової порожнини та пародонту [36, 37]. Серед полімерів, які часто використовуються у стоматології, виділяють поліметилметакрилат (PMMA), поліуретан (PU), поліетилен (PE), полікарбонат (PC), полієфіретеркетон (PEEK), поліетиленгліколь (PEG), полідиметилсилоксан (PDMS), полімолочна кислота (PLA), полі(ε-капролактон) (PCL), акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) і поліпропілен (PP) [38].



Рис. 1. Приклади полімерних деталей зубів, виготовлених на 3D-принтері

На рис. 1 наведені приклади полімерних деталей зубів, надрукованих на 3D-принтері. У порівнянні зі звичайними стоматологічними смолами було доведено, що смоли для 3D-друку мають подібну біосумісність [39]. Цю біосумісність можна додатково покращити за допомогою постобробки, як-от затвердіння та промивання.

Металовмісні матеріали. Останніми роками сплави на основі Co-Cr майже винятково використовуються для виробництва металевих зубних протезів. Вони є можливою альтернативою сплавам Ni-Cr для виготовлення реставрацій, оскільки не становлять ризику алергічних реакцій, пов'язаних з Ni, та/або токсичного загострення, пов'язаного з Be. Зараз сплави Co-Cr є одними з найвідоміших сплавів недорогоцінних металів у стоматології з різноманітним і успішним клінічним застосуванням. Висока міцність і нержавіюча природа потрійних сплавів Co-Cr-Mo та Co-Cr-W, вперше запатентованих у 1907 році Хейнсом, призвела до розробки композиційних варіантів сплавів на основі Co для клінічних застосувань, як-от штучний колінний суглоб та кульшові суглоби [40–43]. Як витратний матеріал використовують металеві сплави у вигляді порошків, що є найміцнішим матеріалом для 3D-друку. Металевий порошок Co-Cr також містить молібден, вольфрам, кремній, церій, залізо, марганець і вуглець, тоді як нікель і берилій в складі більше відсутні.

Оксид цирконію. Кераміка з різним хімічним складом, зокрема оксид алюмінію та цирконій, має хорошу механічну стійкість і підходить для полікристалічних керамічних коронок, тому цей вид кераміки є центром досліджень і розробок [44, 45]. Керамічні матеріали вважаються сприятливим матеріалом для реставрації зубів завдяки своїм чудовим механічним властивостям, біосумісності, високій стійкості до стирання та корозії, а також естетичним властивостям. Використання керамічних матеріалів як стоматологічного порошку діоксиду цирконію останнього покоління (3Y-TZP) для 3D-друку в стоматології дозволяє забезпечити природний вигляд і довговічність коронок, мостів та інших видів конструкцій. Перша пропозиція про використання оксиду цирконію в медичних цілях була зроблена в 1969 році й стосувалася ортопедичного застосування. ZrO₂ був запропонований як новий матеріал для заміни головки стегна замість титанових або глиноземних протезів [46]. В останні роки дентальна кераміка на основі діоксиду цирконію стала найкращою альтернативою реставрації зубів на основі металу. Цей матеріал використовувався для виготовлення зубних протезів на початку 1980-х років і привернув значну увагу в стоматологічній спільноті. Він має унікальні властивості, зокрема таким як чудова естетика, включаючи колір, схожий на зуб, низьку бактеріальну адгезію, високу в'язкість до руйнування, міцність на згин,

біосумісність, хорошу стійкість до корозії та зношування. Завдяки видатним властивостям матеріалу його використовують для опорних застосувань, таких як зубні коронки, мости, вініри та абатменти для імплантатів [31, 47–56].

Технології 3D-друку

Стереолітографія (SLA). Сьогодні AM-методи у стоматології розвиваються переважно у двох основних напрямках: фотополімеризація у ванні та порошковий друк. Своєю чергою фотополімеризація у ванні включає стереолітографію (SLA), або цифрову обробку світла (DLP). В основі порошкової AM лежить селективне лазерне спікання (SLS) і селективне лазерне плавлення (SLM). Процес SLA заснований на створенні тривимірних об'єктів шляхом пошарової полімеризації (затвердіння) рідких фотополімерних матеріалів під впливом ультрафіолетового випромінювання або випромінювання видимої частини спектра. Найчастіше в SLA використовується лазерне випромінювання з довжиною хвилі у ближній і середній ультрафіолетовій (УФ) ділянці спектра для забезпечення енергії удару, необхідної для здійснення процесу полімеризації із достатньою швидкістю [57–60].

Моделі, надруковані на стереолітографічних принтерах, мають найвищу роздільну здатність і точність, найчіткіші деталі та найгладшу поверхню порівняно з іншими технологіями 3D-друку з пластику. Тривимірний друк на основі смоли є чудовим варіантом для виготовлення високодеталізованих прототипів, які вимагають жорстких допусків і гладких поверхонь, як-от пресформи, візерунки та функціональні моделі. Моделі, надруковані за технологією SLA, можна легко відшліфувати та/або пофарбувати після друку, в результаті чого готові вироби мають високу деталізацію. Деталі, надруковані на SLA 3D-принтерах, як правило, ізотропні: їхня міцність більш-менш постійна і не залежить від орієнтації, оскільки між кожним шаром утворюються хімічні зв'язки. Це дає змогу створювати деталі з передбачуваними механічними властивостями, які є критичними для таких застосувань, як пристосування, готові вироби та функціональні прототипи.

Цифрова обробка світла (DLP). Хоча SLA та DLP дуже схожі, вони також мають деякі відмінності, основною з яких є тип джерела світла. SLA використовує ультрафіолетовий лазерний промінь, тоді як DLP-цифровий

світлодіодний проектор, який освітлює весь шар одночасно, а не поступово, як лазер у стереолітографії SLA. Отже, у SLA лазерний промінь рухається від точки до точки та призводить до затвердіння смоли від точки до точки, тоді як у DLP джерело світла є нерухомим і полімеризує кожен шар смоли одночасно. Для великих моделей і партій, надрукованих на повній пластині, DLP забезпечує швидший результат. За допомогою DLP-друку сьогодні виготовляють клінічно прийнятні тимчасові та постійні реставрації коронок і незнімних протезів.

Селективне лазерне плавлення (SLM). Серед адитивних методів у цей час SLM найчастіше використовується для розробки каркасів у стоматології для виготовлення безпосередньо металевих стоматологічних медичних деталей, як-от зубні імплантати, коронки, мости та протезні групи зі складною геометрією з нержавіючої сталі, титану та системи сплавів Co-Cr [66, 67]. В ортопедичній стоматології більшість досліджень SLM зосереджено на стоматологічних сплавах Co-Cr, які використовувалися для виготовлення ортопедичних засобів [68, 69]. Дослідження також показали, що Co-Cr протези, виготовлені за технологією SLM, мають кращу стійкість до корозії та вищу міцність порівняно з протезами, виготовленими звичайними методами лиття. SLM — це процедура адитивного виробництва, яка дозволяє друкувати металеві компоненти безпосередньо із 3D-системи автоматизованого проектування (CAD) шляхом швидкого й точного сплавлення дрібного металевого порошку в шари за допомогою лазерного променя високої потужності. Металеві порошки, які використовуються в 3D-друці, повинні бути сферичними та мати суворий розподіл частинок за розміром, щоб досягти гарної пакувальної поведінки. Порошки для наступного шару покриваються розплавленим шаром, і лазер знову сканується відповідно до наступних даних зрізу. Ця послідовність триває доти, доки автоматично не сформується майже чиста форма продуктів. SLM має здатність повністю розплавляти метал у тверду тривимірну структуру [70–72].

Селективне лазерне спікання (SLS). У процесі SLS потужний лазер за допомогою дзеркала впливає на тонкий шар металевого порошку. Пряме лазерне спікання металу не плавить порошок, а натомість нагріває його до точки, близької до температури плав-

лення. Після лазерного сканування кожного шару зверху наноситься новий шар матеріалу. Цей процес триває, доки 3D-об'єкт не буде завершено. SLS продемонстрував значне використання в стоматології у виготовленні каркасів знімних часткових протезів, що значно зменшує людські помилки при традиційних методах. Лазерне спікання забезпечує більш безпечний і передбачуваний результат порівняно з традиційним литтям металу в стоматології [73–77].

Висновок

Одним із найважливіших напрямів ортопедичної стоматології, який пов'язаний із заміщенням втраченого зуба/зубів за допомогою штучних стоматологічних засобів є зубне протезування. Аналіз даних літератури останніх років показав велику увагу до цифрових технологій, які успішно впроваджуються у стоматологічну практику. Однією з таких адитивних технологій є 3D-друк індивідуальних стоматологічних виробів, який кардинально відрізняється від традиційних способів. До витратних матеріалів для 3D-друку в стома-

тології належать полімерні матеріали, фотополімерні смоли, кераміка та метали. 3D-принтер у стоматології дає змогу виготовляти хірургічні шаблони для імплантації, бюгельні протези, коронки, імплантати, моделі щелеп для демонстрації, вироби з гіпсу, форми для лиття зубів, тонкі воскові моделі, зубні зліпки, мостоподібні протези; зліпки часткових протезів, ортодонтичні зліпки та апарати, стоматологічні моделі, а також конструкції для ортодонції. Зараз лікар-стоматолог-ортопед може допомогти надавати пацієнтам більш персоналізоване обслуговування за значно нижчою ціною, спростити складні робочі процеси щодо виробництва стоматологічних пристроїв, а також підвищити якість виготовлення зубних протезів. Сьогодні 3D-друк у стоматології розвивається переважно у двох основних напрямках: фотополімеризація у ванні та порошковий друк. Своєю чергою фотополімеризація у ванні включає стереолітографію (SLA), або цифрову обробку світла (DLP). В основі порошкової АМ лежить селективне лазерне спікання (SLS) і селективне лазерне плавлення (SLM).

ПОСИЛАННЯ

1. Schweiger, J. Edelhoff, D. Güth, J.-F. 3D Printing in Digital Prosthetic Dentistry: An Overview of Recent Developments in Additive Manufacturing. *J. Clin. Med.* 2021; (10):2010–2034. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10092010>
2. Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons.* 2012; (55):155–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
3. Rakov D.L., R.Y. Sukhorukov. Classification and analysis of additive technologies based on the morphological approach. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2021; (50):616–621. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618821070116>
4. Ngo T.D, Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., D. Hui. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Eng.* 2018;143:172–196; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
5. C.W. Hull, Method and Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. Patent US4575330A, Publ. Mar 11, 1986.
6. Klein H.M., Schneider W., Alzen G., Voy E.D., Gunther R.W. Pediatric craniofacial surgery: Comparison of milling and stereolithography for 3D model manufacturing. *Pediatric Radiology.* 1992; (22):458–460. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02013512>
7. Petzold R., Zeilhofer H., Kalender W.A. Rapid prototyping technology in medicine—Basics and applications. *Computerized Medical Imaging and Graphics.* 1999; (23):277–284.
8. Webb P.A. A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering and Technology.* 2000; (24):149–153. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091900050163427>
9. Wang C., Huang W., Zhou Y., He L., He Z., Chen Z., He X., Tian S., Liao J., Lu B., Wei Y., Wang M. 3D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Bioact. Mater.* 2020; (15):82–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.01.004>
10. Potamianos P., Amis A.A., Forester A.J., McGurk M., Bircher M. Rapid prototyping for orthopaedic surgery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* 1998; (212):383–393. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954411981534150>
11. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012; (28):3–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
12. Azari A. Nikzad S. The evolution of rapid prototyping in dentistry: A review. *Rapid Prototyp. J.* 2009; (15):216–225. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540910961946>

13. Beuer F., Schweiger J., Edelhoff D., Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British Dental Journal*. 2008; (204):505–511. DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350>
14. Favaretto M., Shaw D., De Clercq E., Joda T., Elger B.S. Big data and digitalization in dentistry: A systematic review of the ethical issues. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; (17):2495–2510. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072495>
15. Liu Q., Leu M., Schmitt S. Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *Int J Adv Manuf Technol*. 2006; (29):317–335. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2523-2>
16. Gandhi Ranjeet, Parkarwar Pratik C., Bhagwat Vikrant. Digital Dentistry. *Sarvad Publication*, 2024. p.129
17. Haleem A., Javaid M. Role of CT and MRI in the design and development of orthopaedic model using additive manufacturing. *Clin. Orthop. Trauma*. 2018; (9):213–217. DOI: <https://10.1016/j.jcot.2018.07.002>
18. Eong Y.G., Lee W.S., Lee K.B. Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method. *The journal of advanced prosthodontics*. 2018; (10):245–51. DOI: <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.3.245>
19. Xu F., Wong Y.S., Loh H.T. Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2001;(19):283–296. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(01\)89001-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)89001-4)
20. Kessler A., Hickel R., Reymus M. 3D Printing in Dentistry—State of the Art. *Operative Dentistry*. 2020; (45):30–40. DOI: <https://doi.org/10.2341/18-229-L>
21. Al-Fodeh R.S., Al-Wahadni A., Otman B., Almasri M. An update of additive manufacturing (3D printing) in dentistry. *International Arab Journal of Dentistry (IAJD)*. 2023; (14):57–66. DOI: <https://doi.org/10.70174/iajd.v14i1.862>
22. Loges K., Tiberius V. Implementation challenges of 3D printing in prosthodontics: a ranking-type delphi. *Materials*. 2022; (15):431–441. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15020431>
23. Hegedus T., Kreuter P., Kismarci-Antalfy A.A., Demeter T., Banyai D., Vegh A., Geczi Z., Hermann P., Paye, M., Zsembery A., Ahmad Al-Hassiny, Khaled Mukaddam, Valentin Herber, Norbert Jakse, Daniel Vegh. User Experience and Sustainability of 3D Printing in Dentistry. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; (19):1921–1932. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19041921>
24. Revilla-Leon M., Sadeghpour M., Ozcan M. An update on applications of 3D printing technologies used for processing polymers used in implant dentistry. *Odontology*. 2020; 108:331–338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10266-019-00441-7>
25. Lin L., Fang Y., Liao Y., Chen G., Gao C., Zhu P. 3D printing and digital processing techniques in dentistry: a review of literature. *Advanced Engineering Materials*. 2019; (21): 1801013-21. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.12510>
26. Della Bona A., Cantelli V., Britto V.T., Collares K.F., Stansbury J.W. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dental Materials*. 2021;(37):336–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.11.030>
27. Espinar C., Della Bona A., Tejada-Casado M., Pulgar R., Perez M.M. Optical behavior of 3D-printed dental restorative resins: Influence of thickness and printing angle. *Dental Materials*. 2023; (39):894–902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.08.003>
28. Valenti Chiara, Federici Maria Isabella, Masciotti Francesca, Marinucci Lorella, Xhimitiku Iva, Stefano Cianetti, Pagano Stefano. Mechanical properties of 3D printed prosthetic materials compared with milled and conventional processing: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024; (132):381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.06.008>
29. Tsolakis I., Gizani S., Panayi N., Antonopoulos G., Tsolakis A. Three-dimensional printing technology in orthodontics for dental models: A systematic review. *Children*. 2022; (9):1106-1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/children9081106>
30. Jeong Min, Radomski Kyle, Lopez Diana, Liu Jack T., Lee Jason D., Lee Sang J., Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. *Dent J (Basel)*. 2024; (12):1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj12010001>
31. Vasylyev M.O., Gurin P.O. Structure and Properties of 3D Printed Zirconia Applied in Dentistry. *Progress in Physics of Metals*. 2023; (24):106–131. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.24.01.106>
32. Nulty Adam. A literature review of current 3D printing materials in dentistry. *International Dentistry – African Edition*. 2022; (12):70–77. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202105.0316.v1>
33. Thomé T., Lem Erhardt M.C.G., Al Bakri I. A.A., Bedran-Russo A.K., Bertassoni L.E. Emerging Polymers in Dentistry. In *Advanced Polymers in Medicine*; Puoci, F., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2015; p. 265–296.
34. Najeeb S., Zafar M.S., Khurshid Z., Siddiqui F. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *J. Prosthodont. Res.* 2016; (60):12–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2015.10.001>
35. Al-Rababah M., Hamadneh W., Alsalem I., Khraisat A., Karaky A.A. Use of high performance polymers as dental implant abutments and frameworks: A case series report. *J. Prosthodont.* 2019; (28):365–372. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
36. Abduo J., Lyons K., Bennamoun M. Trends in Computer-Aided Manufacturing in Prosthodontics: A Review of the Available Streams. *Int. J. Dent.* 2014; 2014, 783948.
37. Caussin E., Moussally C., Le Goff S., Fasham T., Troizier-Cheyne M., Tapie L., Dursun E., Attal J.-P., Francois P. Vat Photopolymerization 3D Printing in Dentistry: A Comprehensive Review of Actual Popular Technologies. *Materials*. 2024; (17):950–975. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17040950>

38. Rokaya D., Srimaneepong V., Sapkota J., Qin J., Sirileartmukul K., Siritwongrungsom V. Polymeric materials and films in dentistry: An overview. *J. Adv. Res.* 2018; 14:25–34.
39. Wuerschling S.N., Hickel R., Edelhoff D., Kollmuss M. Initial biocompatibility of novel resins for 3D printed fixed dental prostheses. *Dent. Mater.* 2022; (38):1587–1597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.08.001>
40. Mishra A, Hamby M, Kaiser W. "Metallurgy, Microstructure, Chemistry and Mechanical Properties of a New Grade of Cobalt-Chromium Alloy Before and After Porous-Coating". Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications. Ed. Disegi, J, Kennedy, R, & Pilliar, R. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1520/STP14264S>
41. Vasylyev M.O., Mordyuk B.M., Voloshko S.M., Gurin P.O. Microstructure of Co-Cr Dental Alloys Manufactured by Casting and 3D Selective Laser Melting. *Progress in Physics of Metals.* 2022; (23):337–359. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.337>
42. Galante R., Figueiredo-Pina C.G., Serro A.P. Additive manufacturing of ceramics for dental applications: a review. *Dental Materials.* 2019; (35):825–846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.026>.
43. Codruta Victoria Tigmeanu, Lavinia Cosmina Ardelean 1, Laura-Cristina Rusu, Meda-Lavinia Negrutiu. Additive Manufactured Polymers in Dentistry, Current State-of-the-Art and Future Perspectives-A Review. *Polymers.* 2022; (14):3658–3682. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14173658>
44. Marsico C., Carpenter I., Kutsch J., Fehrenbacher L., Arola D. Additive manufacturing of lithium disilicate glass-ceramic by vat polymerization for dental appliances. *Dent Mater.* 2022; (38): 2030–2070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.11.005>.
45. Yao L., Hu P., Zhao Y., Lue Q.T., Nie Z., Yan M., He Zhengdi. Handcrafted digital light processing apparatus for additively manufacturing oral-prosthesis targeted nano-ceramic resin composites. *Sci. Eng. Compos. Mater.* 2021; (28):315–26. DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0031>.
46. Chevalier J. What future for zirconia as a biomaterial? *Biomaterials.* 2006;(27):535–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.07.034>
47. Höland W., Rheinberger V., Apel E., Ritzberger C., Rothbrust F., Kappert H., Krumeich F., Nesper R. Future perspectives of biomaterials for dental restoration. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2009; (29):1291–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.023>
48. Dakskobler A., Jevnikar P., Oblak C., Kosmac T. The processing-related fracture resistance and reliability of root dental posts made from Y-TZP. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007; (27):1565–1570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.121>
49. Studart A.R., Filser F., Kocher P., Gauckler L.J. In vitro lifetime of dental ceramics under cyclic loading in water. *Biomaterials.* 2006; (28):2695–2705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.12.033>
50. Raigrodski A.J. Contemporary materials and technologies for all-ceramic fixed partial dentures: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2004;(92):557–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2004.09.015>
51. Denry I., Kelly J.R. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent. Mater.* 2008; (24):299–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.007>
52. Gautam C., Joyner J., Gautam A., Rao J., Vajtai R. Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton Transactions,* 2016; (45):19194–22. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6DT03484E>
53. Heintze S.D., Rousson V. Survival of Zirconia- and Metal-Supported Fixed Dental Prostheses: A Systematic Review. *The Int. J. Prosthodontics.* 2010; (23):493–513. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/392496>
54. Ginny Soon, Belinda Pinguan-Murphy, Khin WeeLai, Sheikh Ali Akbar. Review of zirconia-based bioceramic: Surface modification and cellular response. *Ceramics Int.* 2016; (42): 12543-12555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.077>
55. Brian R. Stoner, Jason A. Griggs, John Neidigh, Jeffrey R. Piascik. Evidence of yttrium silicate inclusions in YSZ-porcelain veneers. *J. Biomedical Mater. Res.* 2014; (102):441–461. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33021>
56. Shyh-Yuan Lee, and Cho-Pei Jiang. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.984208>. *Mater. Manufacturing Proc.* 2015; (30):1498–1513. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.984208>.
57. Lalatovic Andjela, Vaniev Marat Abdurahmanovich, Sidorenko Nina Vladimirovna, Gres Irina Mikhailovna, Dyachenko Denis Yurievich, Makedonova Yulia Alekseevna. A review on Vat Photopolymerization 3D-printing processes for dental application. *Dental Materials.* 2022; (38): 284–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.09.005>
58. Wang S, Peng L, Song C, Wang C. Digital light processing additive manufacturing of thin dental porcelain veneers. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2023; (43):1161–1168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.080>.
59. D'Haese J., Van De Velde T., Komiyama A.L., Hultin Mand, De Bruyn H. Accuracy and complications using computer-designed stereolithographic surgical guides for oral rehabilitation by means of dental implants: a review of the literature. *Clin. Implant Dent. Relat. Res.* 2012; (14): 321–356. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2010.00275.x>
60. Layani M., Wang X., Magdassi S. Novel materials for 3D printing by photopolymerization. *Advanced Materials.* 2018; (30): article e1706344. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201706344>

61. Khorsandi D., Fahimipour A., Abasian P., Saber S.S., Seyedi M., Ghanavati S., Ahmad A., De Stephanis A.A., Taghavinezhaddilami F., Leonova A., et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater.* 2021; (122):26–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.044>.
62. Park J.Y., Jeong D., Lee J.J., Bae S.Y., Kim J.H., Kim W.C. In vitro assessment of the marginal and internal fits of interim implant restorations fabricated with different methods. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2016; (116):536–542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.03.012>.
63. Unkovskiy A, Schmidt F, Beuer F, Li P, Spintzyk S, Kraemer Fernandez P. Stereolithography vs. direct light processing for rapid manufacturing of complete denture bases: an in vitro accuracy analysis. *J. Clin. Med.* 2021; (10):1070–1092. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>
64. Etemad-Shahidi Y., Qallandar O.B., Evenden J., Alifui-Segbaya F., Ahmed K.E. Accuracy of 3-Dimensionally Printed Full-Arch Dental Models: A Systematic Review. *J. Clin. Med.* 2020; (9): 3357–3375. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm9103357>
65. Mu Q., Wang L., Dunn C.K., Kuang X., Duan F., Zhang Z., Qi H.J., Wang T. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Addit. Manuf.* 2017; (18):74–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.011>
66. Vandenbroucke B., Kruth J.P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping J.* 2007; (13):196–203. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540710776142>
67. Lee W.-F., Wang J.-C., Hsu C.-Y., Peng P.-W. Microstructure, mechanical properties, and retentive forces of cobalt-chromium removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting followed by heat treatment. *J. Prosthetic Dentistry.* 2022; (127):115–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.06.038>
68. Vasylyev M.O., Mordyuk B.M., Voloshko S.M., Gurin P.O. Microstructure of Co–Cr Dental Alloys Manufactured by Casting and 3D Selective Laser Melting. *Progress in Physics of Metals.* 2022; (23):337–359. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.337>
69. Wei W., Zhou Y., Liu W., Li N., Yan I., Li H. Microstructural characterization, mechanical properties, and corrosion resistance of dental Co–Cr–Mo–W alloys manufactured by selective laser melting. *J. Mater. Eng. Perform.* 2018; (27):5312–5320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3520-6>
70. Van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent. Mater.* 2012; (28):3–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
71. Kassapidou M., Franke Stenport V., Hjalmarsson L., Johansson C.B. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden. *Acta Biomater Odontol Scand.* 2017; (3):53–62. DOI: <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
72. Barbin Thai., Velôso D.V., Del Rio Silva Leti., Borges G.A., Camacho Presotto A.G., Barão V.A.R., Mesquita M.F. 3D metal printing in dentistry: An in vitro biomechanical comparative study of two additive manufacturing technologies for full-arch implant-supported prostheses. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 2020; (108):103821–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103821>.
73. Mazzoli A. Selective laser sintering in biomedical engineering. *Medical & Biological Engineering & Computing.* 2013; (51): 245–256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11517-012-1001-x>.
74. Kim, K.-B.; Kim, W.-C.; Kim, H.-Y.; Kim, J.-H. An evaluation of marginal fit of three-unit fixed dental prostheses fabricated by direct metal laser sintering system. *Dent. Mater.* 2013; (29): 91–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.04.007>
75. Yang J., Li H., Xu L., Wang Y. Selective laser sintering versus conventional lost-wax casting for single metal copings: A systematic review and meta-analysis. *J. Prosthet. Dent.* 2022; (128): 897–904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.02.011>.
76. Liwei Lin, Yingfeng Fang, Yuxuan Liao, Gang Chen, Chunxia Gao, Peizhi Zhu. 3D Printing and Digital Processing Techniques in Dentistry: A Review of Literature. *Advanced Engineering Materials.* 2019;(21):1801013–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201801013>
77. Goguta L., Lungeanu D., Negru R., Birdeanu M., Jivanescu A., Sinescu C. Selective Laser Sintering versus Selective Laser Melting and Computer Aided Design—Computer Aided Manufacturing in Double Crowns Retention. *J. Prosthodont. Res.* 2021; (65):371–378. DOI: https://doi.org/10.2186/jpr.JPOR_2019_556

3D-printing in orthopedic dentistry (literature review)

Gurin P.¹, Bida V.¹, Vasylyev M.²

¹ P. L. Shupyk National University of Health Care, Kyiv, Ukraine

² G. V. Kurdyumov Institute of Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Introduction. Dental prosthetics is one of the most important areas of dentistry, and it is related to replacing a lost tooth/tooth with the help of artificial dental devices. To solve the problems of the traditional molding and closed stamping process, 3D printing is currently considered a new candidate for the manufacture of customized dental products, which is attracting more and more attention worldwide.

All consumables for 3D printing in dentistry are divided into polymer materials, photopolymer resins, ceramics, and metals. The advantages of 3D- printing include the production of desired prostheses and models with the least amount of material and the ability to create several products simultaneously. With the help of a 3D printer in dentistry, the following are made: surgical templates for implantation, brace prostheses, crowns, implants, models of jaws for demonstration, plaster products, forms for casting teeth, thin wax models, dental casts, bridge prostheses; casts of partial dentures, orthodontic casts, and devices, dental models, constructions for orthodontics.

Goal. Based on a thorough analysis of literary sources, study the main methods of 3D-printing in orthopedic dentistry as part of digital medical technologies.

Materials and methods. Scientific sources were searched and analyzed using scientometric databases: Web of Science, PubMed, Google Scholar, ScienceDirect.com (Science, health, and medical journals), and ResearchGate recently.

Conclusion. Recent literature analysis has indicated that dentists are interested in developing and applying 3D-printing methods for dental prosthetics, which have significant advantages over traditional technologies.

Keywords: *orthopedic stomatology, dentures, additive technologies, 3D-printing, polymers, metals, ceramics*

Гурин Петро Олексійович — кандидат медичних наук, доцент кафедри ортопедичної стоматології, цифрових технологій та імплантології НУОЗ України імені П. Л. Шупика

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0495-754X>

Біда Віталій Іванович — доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри ортопедичної стоматології, цифрових технологій та імплантології НУОЗ України імені П. Л. Шупика

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4499-855X>

Васильєв Михайло Олексійович — доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (vasil1934@ukr.net)

Стаття: надійшла до редакції 12.10.2024 р.; прийнята до друку 12.02.2025 р.