

**СТАНІСЛАВ КОВАЛЬОВ**

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
Український Державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0001-8839-2392>  
e-mail: [sv\\_kovalyov@i.ua](mailto:sv_kovalyov@i.ua)

**НАДІЯ КОВАЛЬОВА**

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
Український Державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0009-0000-9347-9863>  
e-mail: [n.kovalyova2000@gmail.com](mailto:n.kovalyova2000@gmail.com)

**ОЛЕГ КАЛІНІЧЕНКО**

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
Український Державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0001-5597-6084>  
e-mail: [kalinichenkooleg1@gmail.com](mailto:kalinichenkooleg1@gmail.com)

**КОСТЯНТИН СУХИЙ**

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
Український Державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0002-4585-8268>  
e-mail: [ksukhyy@gmail.com](mailto:ksukhyy@gmail.com)

**ОЛЕКСАНДР ОВЧИННИКОВ**

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
Український Державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0002-5649-1094>  
e-mail: [iaov31@gmail.com](mailto:iaov31@gmail.com)

## МЕТОДИКА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ СТВОРЕННІ ІНДИВІДУАЛІЗОВАНИХ ІМПЛАНТАТІВ

Робота присвячена опису методики моделювання індивідуалізованих імплантів із застосуванням медичної інформації. Методика складається з п'яти кроків. Для реалізації методики потрібно застосування комп'ютерних програм InVesalius, SolidWorks, PrusaSlicer та деяких інших. Першим кроком є одержання скану тіла людини за допомогою комп'ютерної томографії або магніто-резонансної томографії у форматі DICOM. Другим кроком є завантаження пакету DICOM в комп'ютерну програму InVesalius для одержання комп'ютерного файлу зі зшитією поверхню форми кістки. Третім кроком є виготовлення 3D комп'ютерної твердотільної моделі кістки в програмі SolidWorks. Четвертим є підготовка моделі до 3D друку з допомогою програми PrusaSlicer і 3D друк прототипу кістки пластиком. П'ятим кроком є друк імплантату в металі на 3D принтері. Подана методика дозволяє швидко та точно проектувати, друкувати у пластику для узгодження плану оперативного втручання та передавати твердотільну модель для друку металом на 3D принтері з виготовленням індивідуалізованого імплантату.

Ключові слова: імплантат, моделювання, комп'ютерне проектування, медична інформація, SolidWorks, 3D друк.

STANISLAV KOVALYOV,

NADIYA KOVAL'OVA,

OLEH KALINICHENKO,

KOSTIANTYN SUKHYI,

OLEKSANDR OVCHYNNYKOV

Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology",  
Ukrainian State University of Science and Technology

## COMPUTER MODELING TECHNIQUE FOR CREATING INDIVIDUALIZED IMPLANTS

The work is devoted to the description of the method of modeling individualized implants using medical information.

The aim of the work is step-by-step method of computer modeling of an individualized implant and the object of its installation.

The following software was used to develop the methodology: InVesalius, SolidWorks, and PrusaSlicer. The prototype of the modeled jaw was printed on the AnyCUBIC Photon Mono X2 photopolymer printer, which prints using SLA technology.

The method consists of five steps. The implementation of the method requires the use of computer programs InVesalius, SolidWorks, PrusaSlicer and some others. The first step is to obtain a scan of the human body using computed tomography or magnetic resonance imaging in DICOM format. The second step is to load the DICOM package into the InVesalius computer program to obtain a computer file with a stitched surface of the bone shape. The third step is to manufacture a 3D computer solid-state model of the bone in the SolidWorks program. The fourth is to prepare the model for 3D printing using the PrusaSlicer program or a similar one. At this step, the implant and the bone models that come into contact with it are printed (for visual assessment of the bone areas attached to the implant in the preoperative period). The printed version of the jaw is made of photopolymer by printing on a 3D printer. The fifth step is to print the implant in metal on a 3D printer.

The authors propose a new Zr-Nb-Ti alloy for the manufacture of implants by 3D printing with subsequent surface treatment of the alloy to form a bioactive coating, in order to better implant adhesion.

The presented method of computer modeling allows you to quickly and accurately design and transfer a solid-state model for metal printing on 3D printers.

Keywords: implant, modeling, computer-aided design, medical information, SolidWorks, 3D printing.

### Постановка проблеми

В результаті збройної агресії Російської Федерації військові та цивільні громадяни України отримали поранення. Для відновлення рухової активності та повернення якості життя деяким громадянам України потребується встановлення імплантатів. На сьогодні виробництво вітчизняних імплантатів та систем фіксації не може забезпечити такі великі потреби, особливо, при виготовленні індивідуалізованих імплантатів. У зв'язку з цим галузь проектування медичних імплантатів потребує розвитку, а саме вдосконалення методів швидкого і точного конструювання імплантатів з застосуванням сучасної комп'ютерної техніки та існуючих програмних засобів. Розробка чіткої методики дій при проектуванні індивідуалізованих імплантатів суттєво скоротить час на проектування імплантату та забезпечить розробку найкращої конструкції імплантату і системи його фіксації. Тому розробка методики комп'ютерного моделювання індивідуалізованих імплантатів є актуальною та затребуваною.

### Аналіз останніх джерел

З розвитком технології автоматизованого проектування/автоматизованого виробництва (computer aided design (CAD))/(computer aided manufacturing (CAM)) стало можливим реконструювати різні дефекти в організмі людини за допомогою більш точного передопераційного планування та проектування індивідуальних імплантатів, що дозволяє скорочувати час операції та попереджати різні ускладнення, які можуть виникати при використанні традиційного методу планування операції. Вибором відповідного методу проектування, процесу виготовлення та типу матеріалу імплантату, відповідно до випадку, можна отримати більш точну хірургічну процедуру та прогнози результати порівняно з традиційним методом [1].

Процес виготовлення індивідуалізованих медичних імплантатів – це багатостадійний процес, який умовно можна розділити на наступні стадії:

- комп'ютерна томографія (КТ) частини тіла, де планується встановлювати імплантат;
- 3D моделювання об'єкту, в якому буде використовуватись імплантат та самого імплантату;
- виготовлення моделі об'єкту та прототипу імплантату;
- виготовлення самого імплантату.

Стадії виготовлення медичних імплантатів можуть відрізнятися в залежності від задач хірургічного втручання та типу імплантату. Наприклад, підготовка операцій в галузі краніопластики може виключати стадію друку моделі об'єкту. На основі даних моделювання об'єкту в програмі визначаються розміри імплантату і методом 3D-друку виготовляється форма для імплантату, а сам імплантат виготовляється методом лиття [2]. Реконструкція травми орбіти в галузі щелепно-лицевої хірургії може проводитись без друку прототипу імплантату. Після процедури моделювання об'єкту встановлення і самого імплантату друкується тільки модель об'єкту, а імплантат виготовляється фрезеруванням металевієї пластини, і далі його форма і розміри перевіряються на моделі об'єкту [3]. Складні хірургічні операції з видалення кісткових пухлин нижньої щелепи з подальшою реконструкцією втрачених тканин та повернення їх функціональності включають стадії виготовлення моделі об'єкту імплантування, шаблонів для резекції пошкодженої кістки та прототипу кісткового імплантату методом 3D друку [4, 5].

Слід зауважити, що стадія 3D моделювання об'єкту, в якому буде використовуватись імплантат, та самого імплантату є обов'язковою стадією процесу виготовлення індивідуалізованих медичних імплантатів. Для її реалізації спочатку отримують КТ зображення об'єкту імплантування в тілі людини, які перетворюються на цифрові зображення для комунікацій у медицині (Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)) [1, 6-8]. Для подальшого 3D моделювання прототипу імплантату та об'єкту імплантації файли з програми DICOM конвертують в формат стандартної мови триангуляції (Standard Triangulation Language (STL)) [1, 9]. Програмне забезпечення для аналізу медичних зображень здатне витягувати складну геометричну інформацію об'єкту з КТ для побудови 3D цифрової моделі, яка практично поєднує в собі як об'ємне, так і зображення поверхні [10]. Для подальшого процесу моделювання може використовуватись наступне програмне забезпечення: Mimics (Materialize, Leuven, Belgium), SolidWorks (Dassault Systemes, Velizy-Villacoublay, France), Amira (FEI Visualization Sciences Group, Merignac, France), Rhino (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA, USA) and SurgiCase CMF (Materialize, Leuven, Belgium) [1].

Авторами-учасниками держбюджетної теми 0123U102008 був запропонований новий сплав Zr-Ti-Nb [11] для виготовлення імплантатів шляхом 3D друку, вивчені властивості сплаву [11, 12] та запропонований засіб постобробки поверхні сплаву для формування біоактивного покриття [13]. Виготовлення імплантатів з **новітнього сплаву Zr-Ti-Nb потребує розробки** чіткої методики комп'ютерного моделювання індивідуалізованого імплантату та його виготовлення за адитивними технологіями. Слід зауважити, що в наукових публікаціях немає чіткого покрокового опису процедури моделювання.

### Мета роботи

Покрокова методика комп'ютерного моделювання індивідуалізованого імплантату та об'єкту його встановлення.

### Методика експерименту

Для розробки методики використовувалось наступне програмне забезпечення:

- InVesalius;
- SolidWorks;
- PrusaSlicer.

Програмний засіб InVesalius 3.1 - це медична програма візуалізації для 3D-реконструкції. Він використовує послідовність 2D файлів DICOM, одержаних апаратами КТ або МРТ. InVesalius дозволяє експорт 3D об'ємів або поверхонь, як сітки даних для одержання фізичних анатомічних моделей для адитивних технологій (3D друк). Програма розроблена Центром інформаційних технологій Renato Archer (СТИ), Національною радою з наукового та технічного розвитку міністерство охорони здоров'я Бразилії. Більше інформації на сайті компанії <https://www.cti.gov.br/invesalius>. Програма розповсюджується безкоштовно за умови наукового використання.

Рішення SolidWorks 2021 – це один із найкращих світових засобів для 3D моделювання. Цей програмний засіб дозволяє обробляти та проектувати поверхні та твердотільні моделі. Програма розповсюджується офіційними дилерами (в Україні ІТ САПР, <http://itsapr.com>). Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» має ліцензію на використання цього програмного продукту.

Комп'ютерна програма PrusaSlicer-2.8.1 виконує підготовку твердотільної моделі для 3D друку пластиком. Програма розповсюджується безкоштовно.

Друк прототипу щелепи виконувався з фотополімеру на принтері AnyCUBIC Photon Mono X2, який виконує друк за технологією SLA.

### Результати та обговорення

Методика 3D моделювання імплантатів являє собою ланцюг послідовних дій: одержання медичної інформації та застосування комп'ютерних програм InVesalius, SolidWorks та PrusaSlicer із наступним 3D друком.

Для моделювання індивідуалізованих імплантатів ми пропонуємо наступну методику, яка складається з наступних кроків.

*Крок 1. Одержання скану тіла людини за допомогою комп'ютерної томографії або магніто-резонансної томографії.*

За допомогою комп'ютерної томографії (КТ) або магніто-резонансної томографії (МРТ) отримують пошарові фото необхідної ділянки тіла людини. Одержані дані перетворюються на цифрові зображення для комунікації у медицині (по протоколу Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)). Дані КТ або МРТ розміщуються у директорії на фізичному носії з однойменною назвою, який видається пацієнту на руки. Файли потрібні для зчитування одержаної медичної інформації спеціальною програмою з наступною обробкою.

*Крок 2. Пакет DICOM завантажується в комп'ютерну програму для одержання комп'ютерного файлу зі зшитого поверхнею.*

Прикладом такої програми є InVesalius. Ця комп'ютерна програма дозволяє завантажувати файли зображення DICOM та проводити їх обробку. Програма має зручний інтерфейс та покрокову структуру, що веде користувача до одержання кінцевого результату. Інтерфейс програми показано на рис.1. Першою дією є завантаження (Імпорт) даних DICOM з директорії фізичного носія, або відкриття проекту, якщо файли вже були завантажені раніше.

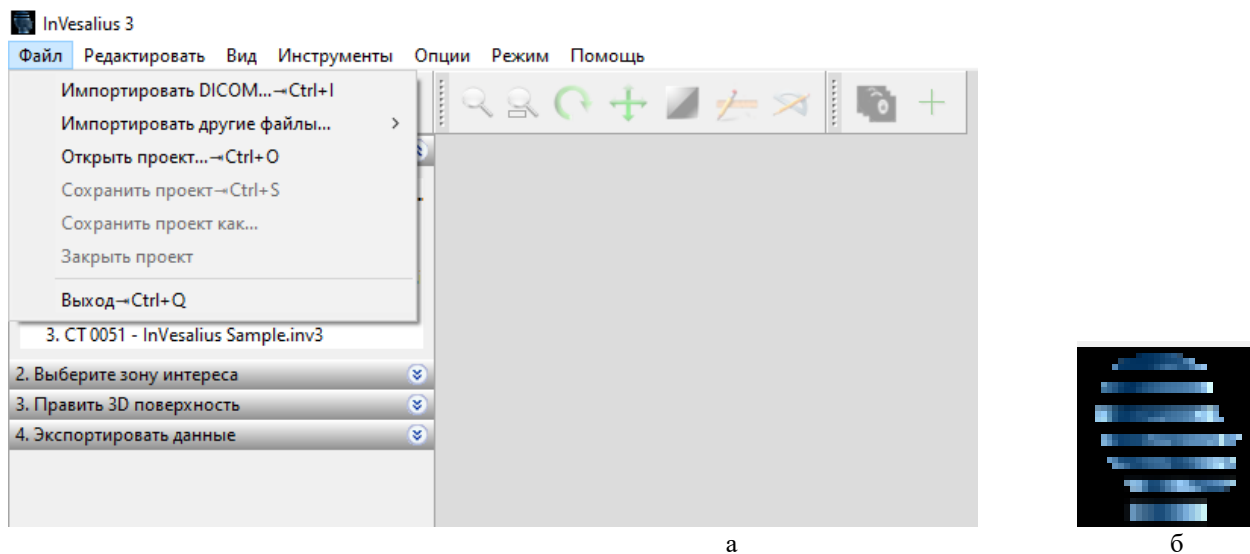


Рис. 1. Імпорт пакету DICOM (а) та піктограма програми InVesalius (б)

Програма InVesalius формує перелік зображень (рис. 2), які треба обрати для підготовки поверхні людської кістки. Після вибору папки DICOM зображення завантажуються у пам'ять комп'ютера с формуванням нового проекту в програмі. Програма показує кількість зображень та пропонує застосувати їх усі або вибрати деякі з них. Якщо вибираються деякі зображення програма працює швидше, але втрачається точність.

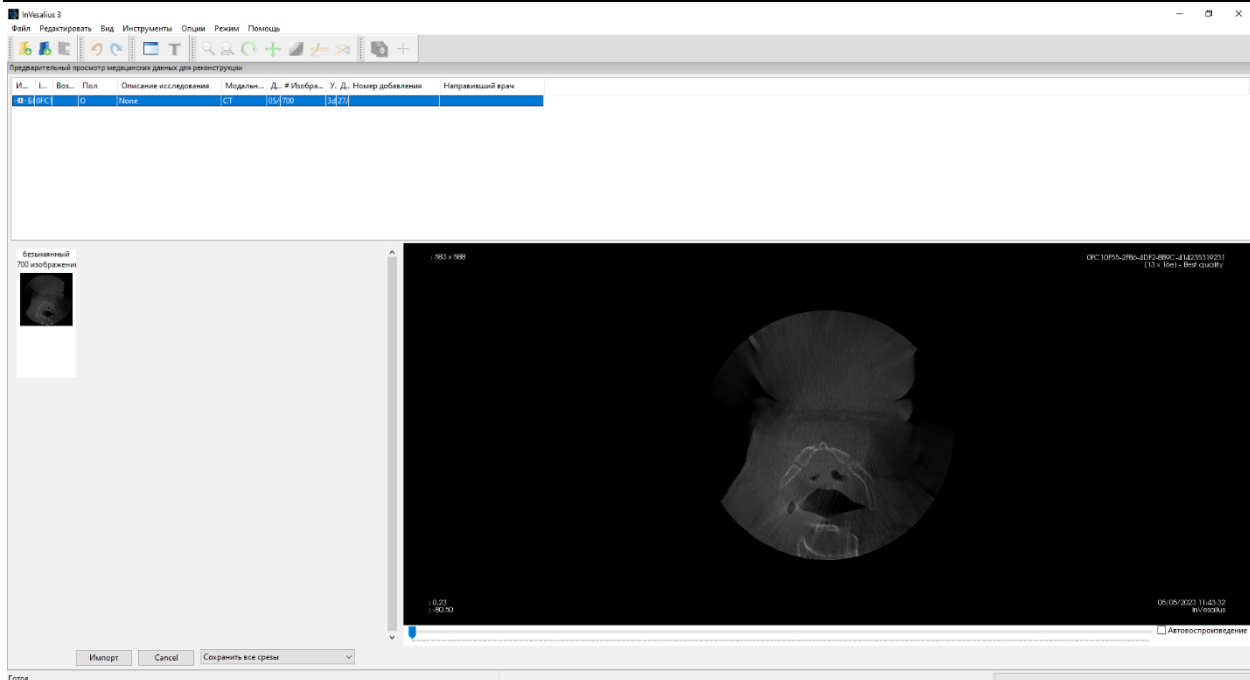


Рис. 2. Вибір зображень з пакету DICOM

Наступною дією є завдання параметрів поверхні, що буде будуватись, а саме кольору поверхні. Крім того, необхідно вказати тип тканини або кістки (рис. 3). Це одна із самих точних операцій, тому що на цьому кроці необхідно вибрати такі умови побудови поверхні, які б дозволили прибрати «шуми» і одержати чітке зображення кістки. На рис. 3 видно багато деяких поодиноких точок зеленого кольору, це і є «шуми» які треба прибрати, скориставшись кольоровим повзуном.

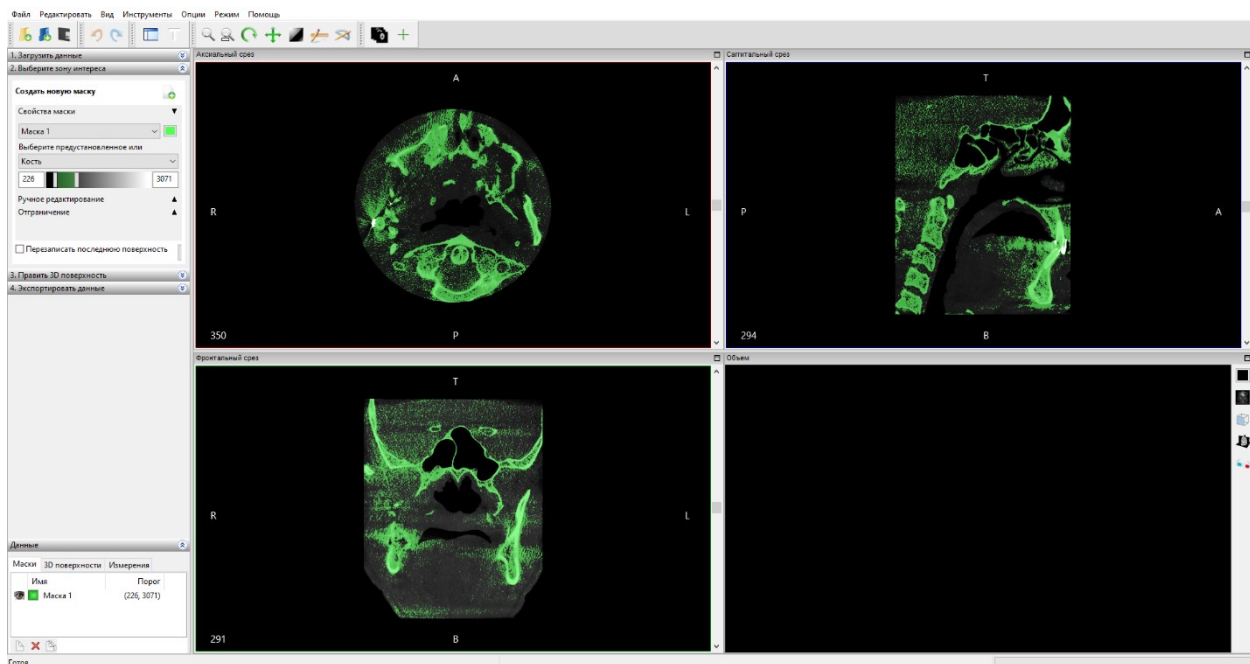
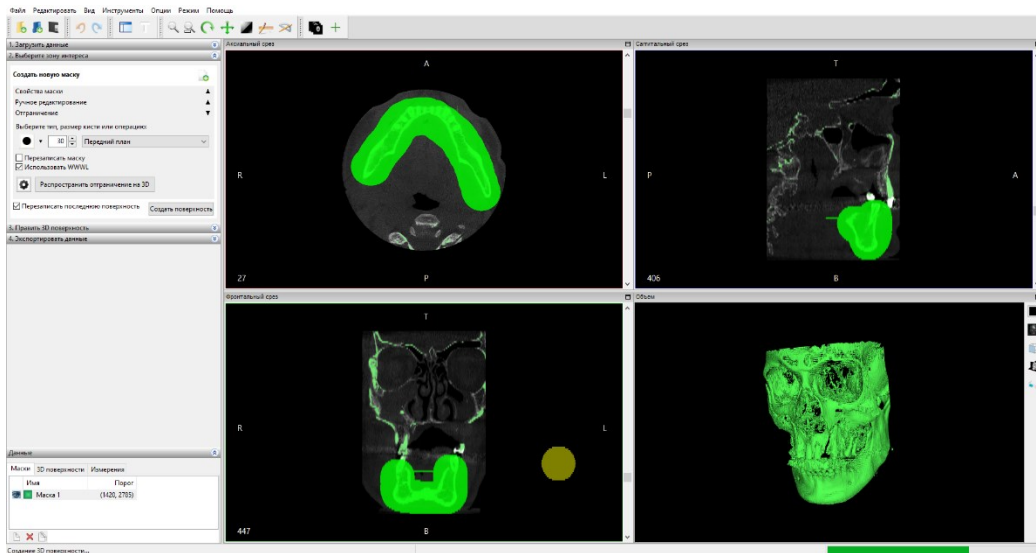
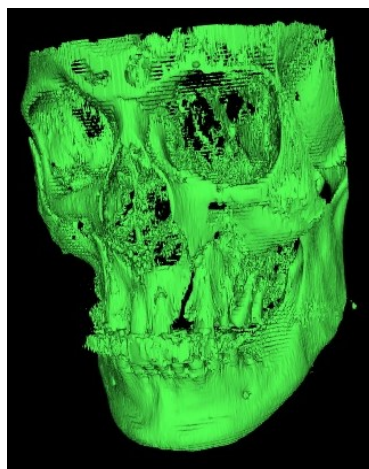


Рис. 3. Вибір кольору та типу кістки

Далі програма запускає процес формування поверхні в 3D вигляді. Це займає тривалий час і залежить від кількості знімків, обраних для формування моделі на попередньому етапі (див. рис. 2). Одержана 3D модель поверхні може бути відкоригована та з неї можуть бути виключені непотрібні фрагменти (рис. 4). Поверхню сформовано та представлено у правому нижньому вікні на рис. 4а та рис. 4б. Як видно з рис. 4, в програмі сформовано поверхню всього черепа. В нашому завданні треба було зробити модель тільки щелепи. За допомогою параметру «найбільша поверхня» обираємо тільки щелепу, відокремлюючи її від черепа (рис. 5).



а



б

Рис. 4. Редагування з одержанням 3D поверхні: а – інтерфейс програми InVesalius, б – згенерована поверхня щелепи

Далі 3D модель поверхні щелепи (рис. 5) зберігають в файлі з розширенням \*.stl для подальшої обробки у 3D редакторі SolidWorks.

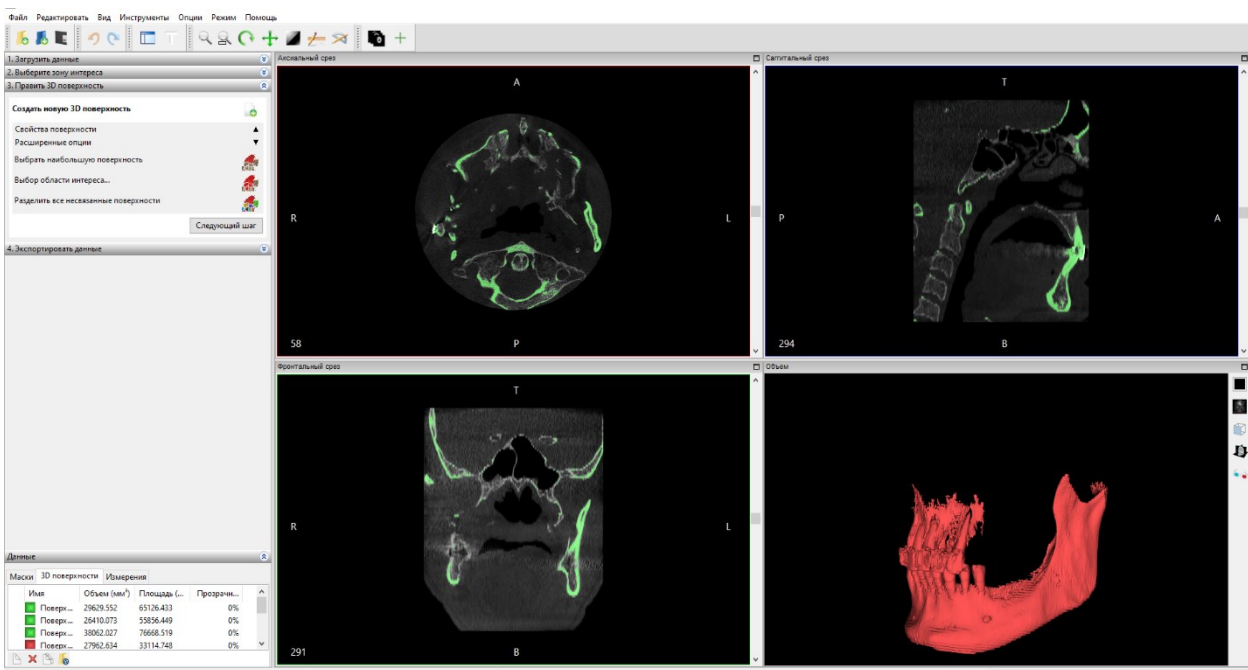


Рис. 5. Одержання поверхні щелепи у інтерфейсі програми InVesalius

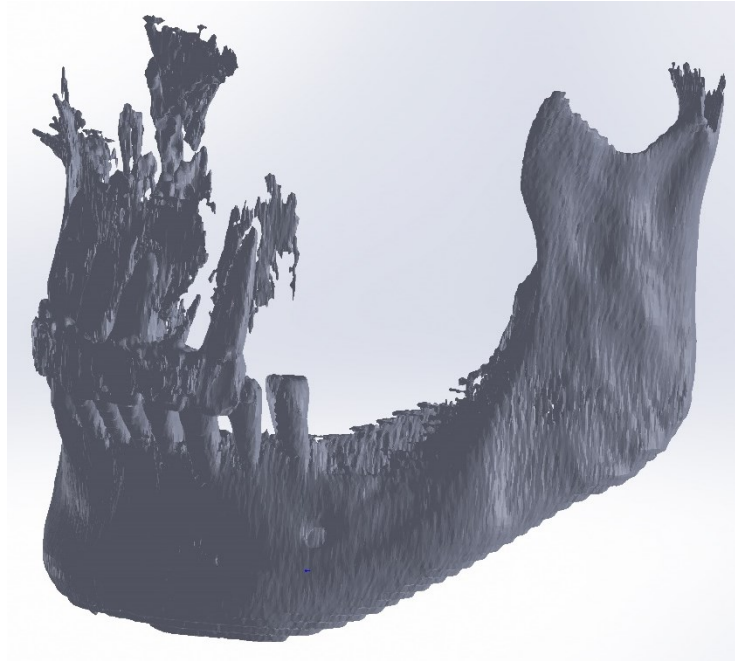
**Крок 3. Виготовлення 3D комп'ютерної моделі кістки.**

В програму 3D моделювання SolidWorks завантажується \*.stl файл (одержаний на минулому кроці), що являє собою поверхню (рис. 5). Поверхня обробляється інструментами моделювання SolidWorks (рис. 6) з утворенням твердотільної моделі, яку можна обробляти засобами комп'ютерного моделювання (рис. 7). Для цього застосовується багато процедур та можливостей SolidWorks.

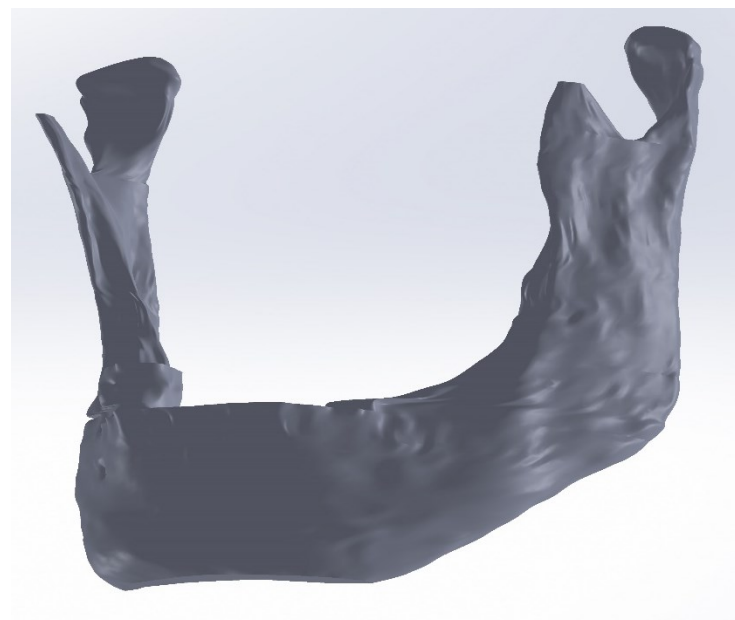
Далі з отриманою твердотільною моделлю кістки можна працювати в SolidWorks для одержання:

- 1) прототипу щелепи з пластику шляхом друку на 3D принтері (процедура обробки описана нижче),
- 2) прототипу імплантату,
- 3) засобів, які необхідні для з'єднання кісток або деталі для закріплення імплантату.

Одержана твердотільна 3D модель зберігається у форматі \*.stl для подальшого друку.



**Рис. 6. Поверхня завантажена в програму SolidWorks**



**Рис. 7. Твердотільна 3D модель одержана в SolidWorks**

**Крок 4. Підготовка моделі до 3D друку.**

Твердотільна модель передається в програму для підготовки моделі для друку (так званий - "слайсер"), наприклад, PrusaSlicer (PrusaSlicer-2.8.1+win64-202409181359). Ця програма підготує одержану на попередньому кроці твердотільну модель для друку. В програмі обирається орієнтація моделі для друку (це має значення з точки зору механічних властивостей надрукованої моделі), кількість моделей, підтримки (це опори, які розташовані під моделлю у просторі і дозволяють друкувати деталі надскладної конфігурації), а також налаштувати параметри принтеру і матеріалу для друку. Програма «слайсер» утворює

машинний код для виконання принтером, тобто по суті є САМ системою. Одержаний код зберігається в файлі з розширенням \*.gcode.

*Крок 5. Друк та обробка імплантату.*

На цьому етапі відбувається друк імплантату та моделі кісток, які входять з ним у контакт (для візуальної оцінки приєднання імплантату до ділянок кісток в доопераційному періоді). В нашому прикладі ми роздрукували варіант щелепи, виготовлений з фотополімеру шляхом друку на 3D принтері AnyCubic за технологією SLA (рис. 8).

Авторами пропонується новітній сплав Zr-Nb-Ti для виготовлення імплантатів шляхом 3D друку з наступною обробкою поверхні сплаву для формування біоактивного покриття, з метою кращого приживлення імплантату.



Рис. 8. Фото щелепи виготовленої шляхом 3D друку

### Висновки

В роботі було запропоновано покрокову методику моделювання, яка починається з обробки медичної інформації, одержаної за допомогою КТ та МРТ, з подальшим моделюванням поверхні, проєктуванням твердотільної моделі імплантату та виготовленням індивідуалізованих імплантатів друком на 3D принтері.

Авторами пропонується новітній сплав Zr-Ti-Nb для виготовлення імплантатів шляхом 3D друку з наступною обробкою поверхні сплаву для формування біоактивного покриття, з метою кращого приживлення імплантату.

Подана методика моделювання дозволяє швидко та точно проєктувати та передавати твердотільну модель для друку біосумісним сплавом на 3D принтерах з наступним нанесенням на поверхню імплантату біосумісного покриття.

### Подяка

Автори щиро дякують Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку науково-дослідної роботи «Новітні низькомодульні сплави Zr-Ti-Nb для виготовлення адитивними технологіями індивідуалізованих біосумісних імплантів з удосконаленою функціональною поверхнею», номер держреєстрації 0123U102008.

Автори також дякують українській компанії ІТ САПР (<http://itsapr.com>) за можливість одержання безкоштовної ліцензії для університету на одну з найкращих програм для 3D моделювання SolidWorks2021.

### Література

1. Oh, J. H. Recent advances in the reconstruction of cranio-maxillofacial defects using computer-aided design/computer-aided manufacturing / J. H. Oh // Maxillofacial plastic and reconstructive surgery. – 2018. – Vol. 40, № 1. – P. 2–7. <https://doi.org/10.1186/s40902-018-0141-9>
2. Sürme, M. B. Cranioplasty with preoperatively customized Polymethyl-methacrylate by using 3-Dimensional Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Mold / M. B. Sürme, O. B. Hergunsel, B. Akgun, M. Kaplan // Journal of Neuroscience and Neurological Disorders. – 2018. – Vol. 2, № 2. – P. 052-064. <https://dx.doi.org/10.29328/journal.jnnd.1001016>
3. Graham, D. O. A Literature Review of Rapid Prototyping and Patient Specific Implants for the Treatment of Orbital Fractures / D. O. Graham, C. G. T. Lim, P. Coghlan, J. Erasmus // Craniomaxillofacial Trauma and Reconstruction. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 83–89. <https://doi.org/10.1177/19433875211004314>

4. Пантус, А. Відновлення дефекту нижньої щелепи титановою конструкцією з пористою проміжною частиною / А. Пантус, І. Костишин, Г. Гірна, Н. Фрич // Вісник стоматології. – 2023. – Т. 123, № 2. – С. 82–88. <https://doi.org/10.35220/2078-8916-2023-48-2.16>
5. Liu, Y. F. Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing / Y. F. Liu, L. W. Xu, H. Y. Zhu, S. S. Y. Liu // BioMedical Engineering OnLine – 2014. – Vol. 13 № 1. – P. 63. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-13-63>
6. Shinya, A. The Effect of Implant Length and Diameter on Stress Distribution around Single Implant Placement in 3D Posterior Mandibular FE Model Directly Constructed Form In Vivo CT / A. Shinya, Y. Ishida, D. Miura, A. Shinya // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 7344. <https://doi.org/10.3390/ma14237344>
7. Srikanth, A. Evaluation of Soft Tissue Changes Following Orthognathic Surgery Using Virtual Surgical Planning Software / A. Srikanth, S. Somasundaram, K. Raja // Cureus. – 2024 – Vol. 16, № 6. <https://doi.org/10.7759/cureus.63495>
8. Andreucci, C. A. Biomechanics of a Novel 3D Mandibular Osteotomy Design / C. A. Andreucci, E. M. M. Fonseca, R. N. Jorge // Designs. – 2024. – Vol. 8, № 3. – P. 57. <https://doi.org/10.3390/designs8030057>
9. Fernandes, N. Reconstruction of an extensive midfacial defect using additive manufacturing techniques / N. Fernandes, J. van den Heever, C. Hoogendijk, S. Botha, G. Booysen, J. Els // Journal of Prosthodontics. – 2016. – Vol. 25, № 7. – P. 589–594. <https://doi.org/10.1111/jopr.12487>
10. Zhao, L. Application of Virtual Surgical Planning with Computer Assisted Design and Manufacturing Technology to Cranio-Maxillofacial Surgery / L. Zhao, P. K. Patel, M. Cohen // Archives of Plastic Surgery. – 2012. – Vol. 39, № 4. – P. 309–316. <https://doi.org/10.5999/aps.2012.39.4.309>
11. Mishchenko, O. New Zr-Ti-Nb Alloy for Medical Application: Development, Chemical and Mechanical Properties, and Biocompatibility [Text] / O. Mishchenko, O. Ovchynnykov, O. Kapustian, M. Pogorielov // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>
12. Kovalyov, S.V. Properties of Zr–Ti–Nb and Ti–Al–V alloys [Text] / S.V. Kovalyov, O.V. Ovchynnykov, K.M. Sukhyi, V.S. Yefanov, O.O. Kalinichenko, N.V. Koval'ova // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2024. – Vol. 6. – P. 30–39. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-157-6-30-39>
13. Калініченко, О. Одержання кальцій-фосфатних покриттів на сплаві Ti-Al-V для реконструктивної хірургії / О. Калініченко, С. Ковальов, К. Сухий, В. Єфанов, М. Сухий // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – Т. 2, № 5 – С. 154–160. <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=20538>

## References

1. Oh, J.H. (2018). Recent advances in the reconstruction of cranio-maxillofacial defects using computer-aided design/computer-aided manufacturing. *Maxillofacial plastic and reconstructive surgery*, 40 (1), 2–7. <https://doi.org/10.1186/s40902-018-0141-9>
2. Sürme, M.B. & Hergunsel, O.B. & Akgun, B. & Kaplan, M. (2018). Cranioplasty with preoperatively customized Polymethylmethacrylate by using 3-Dimensional Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Mold. *Journal of Neuroscience and Neurological Disorders*, 2(2), 052-064. <https://dx.doi.org/10.29328/journal.jnnd.1001016>
3. Graham, D.O. & Lim, C.G.T. & Coghlan, P. & Erasmus, J. (2021). A Literature Review of Rapid Prototyping and Patient Specific Implants for the Treatment of Orbital Fractures. *Cranio-maxillofacial Trauma and Reconstruction*, 15(1), 83–89. <https://doi.org/10.1177/19433875211004314>
4. Pantus, A.V. & Kostyshyn, I.D. & Hirna, H.A. & Frych, N.I. (2023). Vidnovlennia defektu nyzhnoi shcheply tytanovoiu konstrukttsiieiu z porystoiu promizhnoi chastynoiu [Restoration of lower jaw bone using a titanium structure with a porous intermediate layer]. *Visnyk stomatolohii - Journal of Dentistry*, 123(2), 82–88 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35220/2078-8916-2023-48-2.16>
5. Liu, Y.F. & Xu, L.W. & Zhu, H.Y. & Liu, S.S.Y. (2014). Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing. *BioMedical Engineering OnLine*, 13(1), 63. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-13-63>
6. Shinya, A. & Ishida, Y. & Miura, D. & Shinya, A. (2021). The Effect of Implant Length and Diameter on Stress Distribution around Single Implant Placement in 3D Posterior Mandibular FE Model Directly Constructed Form In Vivo CT. *Materials*, 14, 7344. <https://doi.org/10.3390/ma14237344>
7. Srikanth, A. & Somasundaram, S. & Raja, K. (2024). Evaluation of Soft Tissue Changes Following Orthognathic Surgery Using Virtual Surgical Planning Software. *Cureus*, 16(6). <https://doi.org/10.7759/cureus.63495>
8. Andreucci, C.A. & Fonseca E.M.M. & Jorge, R.N. (2024). Biomechanics of a Novel 3D Mandibular Osteotomy Design. *Designs*, 8(3), 57. <https://doi.org/10.3390/designs8030057>
9. Fernandes, N. & van den Heever, J. & Hoogendijk, C. & Botha, S. & Booysen, G. & Els, J. (2016). Reconstruction of an extensive midfacial defect using additive manufacturing techniques. *Journal of Prosthodontics*, 25(7), 589–594. <https://doi.org/10.1111/jopr.12487>
10. Zhao, L. & Patel, P. K. & Cohen, M. (2012). Application of Virtual Surgical Planning with Computer Assisted Design and Manufacturing Technology to Cranio-Maxillofacial Surgery. *Archives of Plastic Surgery*, 39(4), 309–316. <https://doi.org/10.5999/aps.2012.39.4.309>
11. Mishchenko, O. & Ovchynnykov, O. & Kapustian, O. & Pogorielov, M. (2020). New Zr-Ti-Nb Alloy for Medical Application: Development, Chemical and Mechanical Properties, and Biocompatibility. *Materials*, 13, 1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>
12. Kovalyov, S.V. & Ovchynnykov, O.V. & Sukhyi, K.M. & Yefanov, V.S. & Kalinichenko, O.O. & Koval'ova, N.V. (2024). Properties of Zr–Ti–Nb and Ti–Al–V alloys. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii – Questions of chemistry and chemical technology*, 6, 30–39. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-157-6-30-39>
13. Kalinichenko, O. & Kovalov, S. & Sukhyi, K. & Yefanov, V. & Sukhyi, M. (2023). Oderzhannia kaltsii-fosfatnykh pokryttiv na splavi Ti-Al-V dlia rekonstruktyvnoi khirurhii [Producing calcium-phosphate coatings on Ti-Al-V alloy for reconstructive surgery application]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Khmelnytskyi National University*, 2(5), 154–160 [in Ukrainian]. <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?p=20538>