

УДК 004.921

ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ЗІ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЮ СІТКОЮ НА ОСНОВІ СЕРІЙ КТ-ЗОБРАЖЕНЬ

Соломін Андрій Вячеславович¹

a.solomin@kpi.ua

Гетун Галина В'ячеславівна²

galinagetun@ukr.net

Богачук Владислав Віталійович¹

bohachuk.vladyslav@lil.kpi.ua

Борисенко Роман Володимирович¹

borysenko.roman@lil.kpi.ua

¹Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

Анотація – Галузь 3D-модельовання наразі є актуальною у багатьох аспектах. Найважливішими зараз є напрями, пов'язані з виготовленням протезів різного призначення. Тут в нагоді приходять методи використання 3D-сканерів або 3D-реконструкції моделей за серіями КТ (МРТ) зображень, що прискорюють та удосконалюють процедури протезування. При проектуванні 3D-об'єкта перед його виготовленням доцільно проводити попереднє тестування відповідної комп'ютерної моделі на міцність та щодо інших механічних характеристик. Для цього така модель має бути достатньої якості щодо можливості використання скінченно-елементного аналізу в пакетах програмного забезпечення САЕ. Зазвичай на цьому етапі виникають труднощі, оскільки моделі, створені на основі реального 3D-сканування або 3D-реконструкції досить складні і не пристосовані для побудови на них якісної сітки скінченних елементів. В роботі пропонується та ілюструється на прикладі моделі колінного суглобу метод подолання цих труднощів, а саме штучний прийом, що полягає у заміні реального об'єкту (результату 3D-реконструкції) на штучний, який повністю повторює форму реального, але здатний до побудови якісної сітки скінченних елементів для подальшого математичного аналізу.

Ключові слова: комп'ютерна графіка, системи відображення, медична фізика, програмна інженерія, 3D-модельовання, комп'ютерне інженерне проектування

I. ВСТУП

Наразі актуальними є задачі створення, редагування 3D-моделей об'єктів, а також їх друкування на 3D-принтерах і дослідження властивостей за допомогою різних програмних пакетів Computer-Aided Engineering (CAE), зокрема, ANSYS або COMSOL. Для створення таких моделей використовуються або процедури побудови «з нуля» на основі ескізів та бібліотек готових простих прототипів, або результати сканування, 3D-реконструкції реальних фізичних об'єктів. Для задач друкування на 3D-принтерах принципових проблем при використанні будь-якого з цих джерел створення об'єктів не виникає, є лише вимоги до формату вихідних файлів. А при реалізації 3D-моделей для скінченно-елементного аналізу у відповідних програмних пакетах САЕ висуваються

досить жорсткі умови саме до якості цих моделей. Адже скінченно-елементний аналіз передбачає розбиття моделей на величезну кількість невеликих за розміром «скінченних елементів», до яких потім застосовуються алгоритми обчислень з використанням систем диференціальних рівнянь [1-10]. Від якості сітки таких скінченних елементів залежить збіжність алгоритмів розв'язування цих рівнянь, точність і стабільність результатів.

При створенні 3D-моделей на основі ескізів та бібліотек готових прототипів суттєвих ускладнень щодо скінченно-елементної сітки не виникає, оскільки в результаті отримані моделі є досить гладкими, симетричними та пристосованими для алгоритмів, що використовуються в аналізі. Інша справа у випадку математичного (комп'ютерного) аналізу 3D-

моделей, які створюються на основі сканування реальних фізичних об'єктів або, зокрема, 3D-реконструкції об'єктів на базі серій КТ чи МРТ зображень. У цих задачах вже ідеальну сітку скінченних елементів отримати досить важко, оскільки об'єкти можуть бути досить складними, не гладкими, не симетричними, а методи створення таких 3D-реконструкцій, як правило, запозичуються зі сторонніх програмних засобів, які не призначені для оптимізації майбутньої сітки скінченних елементів. Досить часто спроби генерації такої сітки для безпосередньо отриманої 3D-реконструкції складного об'єкту закінчуються інформацією про неможливість створення якісної сітки із-за переплутування вузлів, незакритих полігонів, накладання елементів поверхонь, гострих кутів між ними, проміжків між полігонами.

Але приклади математичного аналізу задач, пов'язаних з такими неідеальними моделями, досить цікаві і актуальні для багатьох галузей, зокрема біомедичної інженерії.

II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – запропонувати технологію створення скінченно-елементної моделі складних об'єктів, що задовольняє вимоги програмних пакетів САЕ для математичного аналізу їх фізичних властивостей.

III. СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ КОЛІННОГО СУГЛОБУ НА ОСНОВІ СЕРІЙ КТ-ЗОБРАЖЕНЬ

Досить корисним прикладом застосування комп'ютерного моделювання для математичного аналізу механічних властивостей об'єкта є реалізація та дослідження скінченно-елементної моделі колінного суглобу пацієнта на основі 3D-реконструкції, створеної з серій КТ-зображень. Це дійсно складний об'єкт для моделювання, він принципово не гладкий, не симетричний і не складається зі стандартних бібліотечних прототипів. При спробі безпосереднього створення сітки скінченних елементів у ANSYS Workbench зазвичай з'являється сповіщення про погані елементи

сітки скінченних елементів та неможливість продовження аналізу системи.

Для вирішення проблеми в даній роботі пропонується штучний прийом. Він полягає у використанні спеціального інструменту Shrinkwrap, який немовби «обгортає» модель нескінченно тонкою оболонкою (поверхнею), яка повністю повторює поверхню об'єкта, але побудована за правилами цієї САЕ-програми, отже з використанням створеної поверхні вже можна побудувати модель, яка буде придатна для розділення на «правильні» скінченні елементи. Слід зазначити, що такий інструмент і відповідні можливості з'явилися у сучасному програмному засобі SpaceClaim пакету ANSYS Workbench, який прийшов на заміну застарілому модулю DesignModeler [11-12].

Отже, послідовність дій для побудови моделі колінного суглобу полягає в наступному.

Створена в програмному пакеті 3D-DOCTOR модель 3D-реконструкції колінного суглобу за даними серій КТ-зображень виглядає наступним чином (Рис. 1) [13-14]. Слід зазначити, що структуру суглобової щілини між стегною та великою гомілковою кістками, зокрема менісків та суглобових хрящів, за даними КТ відновити не вдається із-за недостатнього контрасту, тому в досліджуваній моделі ця щілина буде просто заповнена шаром хрящової тканини.

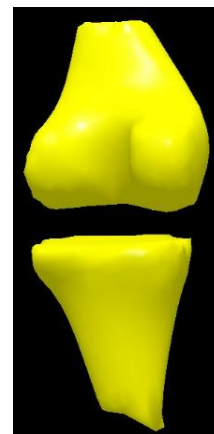


Рисунок 1 – 3D-реконструкція колінного суглобу в програмному пакеті 3D-DOCTOR

Після імпорту в графічний редактор SpaceClaim програмного пакету ANSYS Workbench модель виглядає наступним чином (Рис. 2).

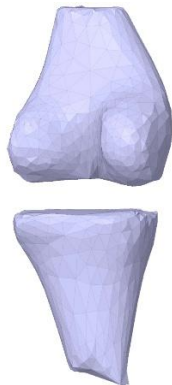


Рисунок 2 – Імпортована в SpaceClaim модель 3D-реконструкції колінного суглобу

Якщо на цьому етапі спробувати будувати скінченно-елементні сітки деталей для подальшого математичного аналізу, то отримаємо сповіщення про погані елементи сітки скінченних елементів та неможливість продовження аналізу системи.

Як згадувалось вище, для подолання цього ускладнення пропонується використати штучний прийом, а саме замість аналізу безпосередньо імпортованої моделі побудувати її аналог, який точно повторює форму прототипу, але придатний для створення «правильної» скінченно-елементної сітки. Для цього використовуємо інструмент Shrinkwrap графічного редактора SpaceClaim, який «обгортає» імпортовану модель нескінченно тонкою поверхнею, яка повністю повторює поверхню об'єкта (Рис. 3).

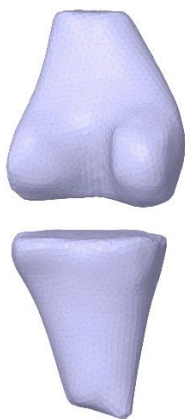


Рисунок 3 – Результат «обгортання» імпортованої моделі оболонкою Shrinkwrap

Після цього імпортований оригінал видаляємо, залишаючи лише створену оболонку, до якої застосовуємо інструмент Shell. За допомогою цього інструменту замість нескінченно тонкої поверхневої оболонки отримуємо стінку кістки визначеної товщини. Цю товщину, як приклад, задаємо величиною 6мм, а розширення оболонки призначаємо за напрямом всередину об'єкта. Результат (в перерізі) зображено на Рис. 4.

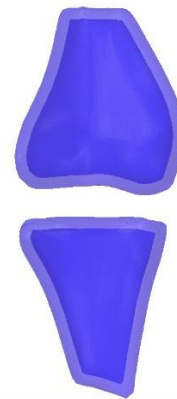


Рисунок 4 – Результат «потовщення» оболонки інструментом Shell

Наступним етапом командою Convert to solid перетворюємо всі отримані складові в 3-вимірні тіла та зазначаємо у властивостях відповідні механічні параметри кістки (з довідників): густина 2000кг/м³, модуль Юнга 18ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,3.

Додаємо у суглобну щілину штучно створений елемент, що має імітувати поведінку структурних елементів, що демпфують та розподіляють навантаження у суглобі (суглобового хряща та менісків). Цей елемент створюємо у вигляді шару хрящової тканини циліндричної форми. У властивостях матеріалу зазначаємо відповідні механічні параметри хряща (з довідників): густина 1100кг/м³, модуль Юнга 0,5МПа, коефіцієнт Пуассона 0,2.

Отримана в результаті описаних процедур в графічному редакторі SpaceClaim модель колінного суглобу зображена на Рис. 5. Вона складається з модельних «деталей»: стегнової кістки, великої гомілкової кістки та прошарку хрящової тканини, що імітує суглобові хрящі та меніски.

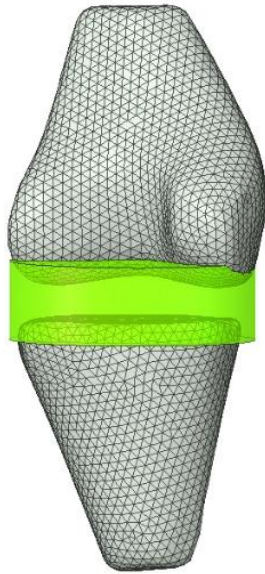


Рисунок 5 – Модель колінного суглобу у зібраному вигляді

Ця модель надалі імпортується в проект ANSYS Workbench. Зазначаються закріплення (фіксації) і навантаження, а також властивості контактів між «деталью» моделі. Навантаження, як приклад, задається направленим донизу та величиною 700Н, що відповідає середній вазі людини при ставанні на одну ногу.

Імпортована модель в проект ANSYS Workbench зображена на Рис. 6.

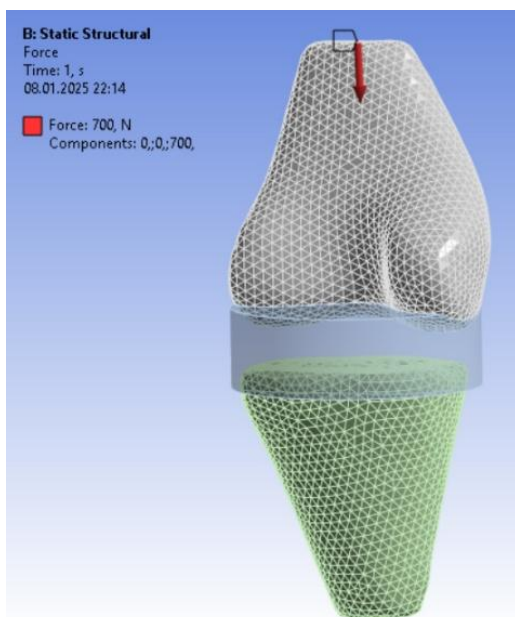


Рисунок 6 – Імпортована модель в проект ANSYS Workbench

Після розрахунку в проекті отримуємо результати у вигляді розподілу механічних сил пружності і деформацій в деталях моделі.

На Рис. 7 відповідними кольорами зображено розподіл деформацій.

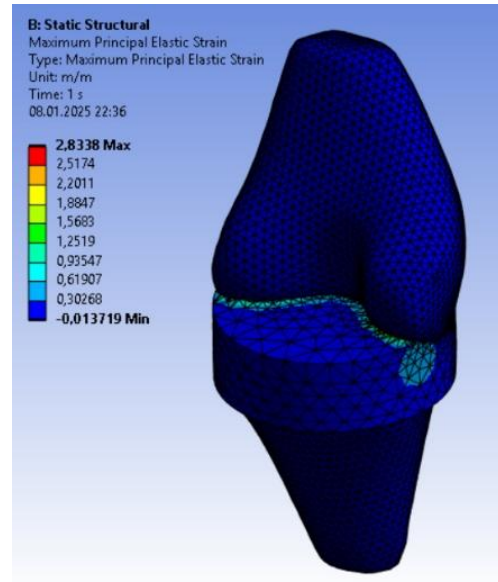


Рисунок 7 – Розподіл деформацій в моделі (величини деформацій позначені кольорами)

На Рис. 8 відповідними кольорами зображено розподіл сил пружності.

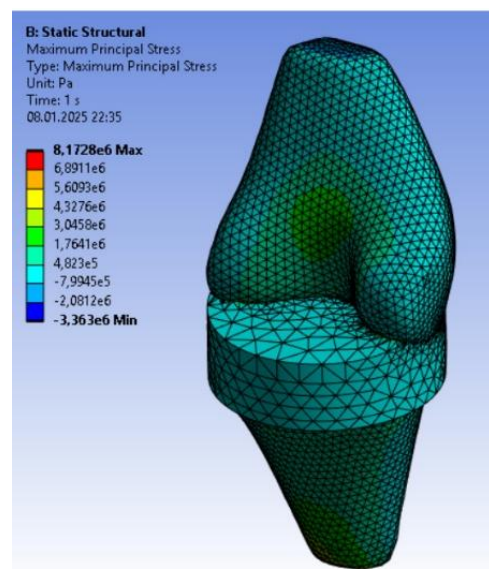


Рисунок 8 – Розподіл сил пружності в моделі

Як видно з результатів, сили пружності майже непомітно відрізняються в різних ділянках моделі (сусідні ділянки у шкалі кольорів), а деформації мають суттєве значення лише в деталі, що імітує суглобові хрящі та меніски. Щоб роздивитись їх розподіл, зробимо невидимими верхню та нижню деталі, залишивши видимою лише середню.

На Рис. 9 зображено розподіл деформацій в середній частині моделі суглобу (вигляд зверху).

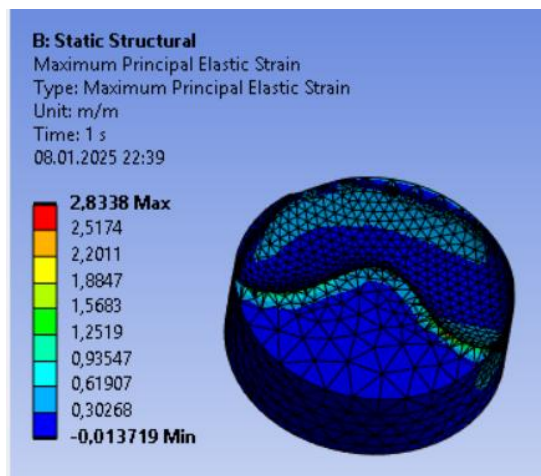


Рисунок 9 – Розподіл деформацій в деталі, що імітує суглобові хрящі та меніски (вигляд зверху)

На Рис. 10 зображено розподіл деформацій в деталі, що імітує суглобові хрящі та меніски (вигляд знизу).

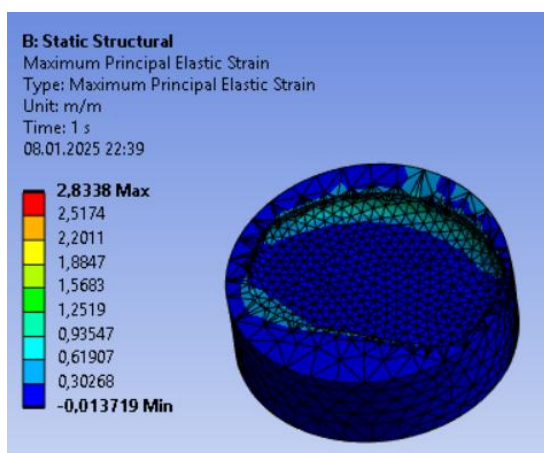


Рисунок 10 – Розподіл деформацій в деталі, що імітує суглобові хрящі та меніски (вигляд знизу)

IV. ВИСНОВКИ

Запропоновано та детально розглянуто на прикладі моделі колінного суглобу технологію створення 3D-моделі зі скінченно-елементною сіткою на основі серій КТ-зображень.

Безпосереднє використання 3D-реконструкцій об'єктів, створених, наприклад, засобами програмного пакету 3D-DOCTOR, не надає можливості отримати модель достатньої якості для виконання математичного аналізу в програмних середовищах CAE, наприклад, у ANSYS Workbench. Із-за складності таких моделей спроба створення достатньо якісної сітки скінченних елементів у таких випадках зазвичай не досягає успіху.

Тому запропоновано штучний прийом, що полягає у заміні реального об'єкту (результату 3D-реконструкції) на штучний, який повністю повторює форму реального, але здатний до побудови якісної сітки скінченних елементів для подальшого математичного аналізу.

Моделювання колінного суглобу використано як ілюстрацію застосування пропонованої технології. Насправді, поле її використання наразі досить широке у зв'язку з проектуванням протезних засобів. Адже доцільно виконувати попереднє тестування проектних моделей на міцність до їх реалізації «в металі», а для цього використовувати засоби CAE. Оскільки такі вироби досить складні і часто застосовують результати 3D-сканування та 3D-реконструкції, то при створенні якісних 3D-моделей для математичного аналізу буде корисно використати запропоновану технологію.

ORCID ID та внесок авторів.

0000-0002-5226-8813 (A, D, F) Andriy Solomin

0000-0002-3317-3456 (D, E) Galina Getun

0009-0009-9263-6041 (B, D) Vladyslav Bohachuk

(C, D) Roman Borysenko

A - Концепція роботи та дизайн;

B - Аналіз даних;

С - Відповідальність за статистичний аналіз;

Д - Написання статті;

Е - Критичний огляд;

Ф - Остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гришанова І.А. Розв'язок задач проєктування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 180с.
2. Кравченко І.В. Інформаційні технології: Системи комп'ютерної математики [Електронний ресурс] / І.В. Кравченко, В. І. Микитенко.– К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 243 с.
3. Huei-Huang Lee Finite Element Simulations with ANSYS Workbench / Lee Huei-Huang. - SDC Publications, 2021. – 600p.
4. Kent Lawrence ANSYS Tutorial Release 2020 / Lawrence Kent. - SDC Publications, 2020. - 190 p.
5. Madenci Erdogan The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS / Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. – Springer, 2007. – 686 p.
6. Saeed Moaveni Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS / Moaveni Saeed. - Pearson, 2014. - 936 p.
7. Stolarski Tadeusz. Engineering Analysis with ANSYS Software / Tadeusz Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Elsevier, 2011. – 480 p.
8. Xiaolin Chen Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench / Chen Xiaolin, Liu Yijun. - CRC Press, 2018 - 471 p.
9. Сайт компанії *ANSYS, Inc.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ansys.com/> – Назва з екрану. – Мова англ.
10. ANSYS Workbench 2021 R1: A Tutorial Approach / Prof. Sham Tickoo Purdue Univ. and CAD/CIM Technologies. - CAD/CIM Technologies, 2021. – 496 p.
11. ANSYS SpaceClaim 2016 User's Guide. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pdfcoffee.com/ansys-spaceclaim-2016-user-guide-pdf-free.html> – Назва з екрану. – Мова англ.
12. Discovery SpaceClaim. Release 2023 R1. - Ansys, Inc., 2023. – 1231p.
13. Сидоренко П.І. Анатомія та фізіологія людини: підручник. - Київ: Медицина, 2018. – 248с.
14. Голубева І.В. Анатомія людини: підручник для студентів медичних вузів. - Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. – 616с.

UDC 004.921

TECHNOLOGY OF CREATING OF 3D MODEL WITH FINITE ELEMENT MESH BASED ON SERIES OF CT IMAGES

Andriy Solomin¹

a.solomin@kpi.ua

Galina Getun²

galinagetun@ukr.net

Vladyslav Bohachuk¹

bohachuk.vladyslav@lil.kpi.ua

Roman Borysenko¹

borysenko.roman@lil.kpi.ua

¹National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

Abstract - The field of 3D modeling is currently relevant in many aspects. The most important areas now are those related to the production of prostheses for various purposes. Methods using 3D scanners or 3D reconstruction of models based on series of CT (MRI) images come in handy here, as they speed up and improve the procedures of prosthetics. When designing a 3D object before its production, it is advisable to conduct preliminary testing of the corresponding computer model for strength and other mechanical characteristics. For this, such a model must be of sufficient quality to enable the use of finite element analysis in CAE software packages. Usually, difficulties arise at this stage because models created based on real 3D scanning or 3D reconstruction are quite complex and not adapted for building high-quality finite element meshes. This work proposes and illustrates, using a knee joint model as an example, a method to overcome these difficulties – namely, an artificial technique that involves replacing the real object (the result of 3D reconstruction) with an artificial one that fully replicates the shape of the real object but is capable of building high-quality finite element meshes for further mathematical analysis.

Keywords: computer graphics, display systems, medical physics, software engineering, 3D modeling, computer-aided engineering