

УДК 004.9:539.3:612.75:616-001.5

Інформаційні технології та системи комп'ютерного тестування несучої спроможності біомеханічних конструкцій металоостеосинтезу

Крищук М.Г., Єщенко В.О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

***Анотація.** Представлено опис інформаційних технологій та систем CT/CAD/CAM/CAE, що використовуються в алгоритмах розв'язання методом скінченних елементів прикладних контактних задач механіки для біомеханічних систем металоостеосинтезу з ушкодженими кістками щелепи та кінцівок людини. Відтворення топологічних даних будови неоднорідних структур біологічних об'єктів, що пружно або в'язкопружно деформуються проводиться за томографічними даними рентгенівської щільності в форматі DICOM. Технічні характеристики елементів конструкцій технологічного походження, лікувальних пристроїв, імплантів використовуються для відтворення їх геометрії в CAD системах. Розроблені алгоритми представлені на прикладі створення узагальненої математичної моделі напружено-деформованого стану біомеханічних систем з використанням коду CAE систем та програм власної розробки для визначення їх функціональної надійності. В розрахунково-експериментальних дослідженнях для визначення сил і площ контактних тисків використовуються плівки Fujji Prescale Photo Film. Застосування інформаційних технологій та систем показано на прикладах розв'язання актуальних прикладних задач біомеханіки металоостеосинтезу та біомеханічних систем передньої черевної стінки людини. Впровадження інформаційних технологій в медичну практику комп'ютерного тестування несучої спроможності біомеханічних конструкцій дозволяє провести покращену діагностику стану біологічних тканин в ділянках ушкоджень та переломів, забезпечити раціональні методи остеосинтезу за рахунок використання біомеханічно обґрунтованих стратегій лікування та скоротити строки тимчасової непрацездатності постраждалих.*

***Ключові слова:** Біомеханіка, інформаційні технології та системи, імітаційна модель, чисельний експеримент, біомеханічна система, механічні характеристики, анізотропні матеріали, кістки, щелепа, кінцівка, ушкодження, напруження, деформації, релаксація, несуча спроможність*

Динамічний розвиток світової медицини на початку XXI сторіччя пов'язаний із широким впровадженням досягнень різних галузей науки і техніки в практику охорони здоров'я. Розробка новітніх лікувально-діагностичних пристроїв, методів хірургічних втручань базується на фундаментальних досягненнях біомеханіки, фізики, матеріалознавства, комп'ютерних наук і нанотехнологій. Медицина стає високотехнологічною галуззю, що використовує надбання інших наукових дисциплін та інтегрує їх з метою розробки нових методів розвитку та підвищення ефективності індивідуального підходу при лікуванні хворих, покращення якості життя, профілактики різноманітних захворювань.

Сучасні методи та інформаційні системи визначення діагностичної інформації дозволяють зафіксувати в часі і просторі різноманітні параметри фізичного стану фізіологічних структур людини. Наприклад, інформація, що отримана такими методами візуалізації біологічних структур, як комп'ютерна томографія, магнітно-резонансна томографія, ультразвукова діагностика, антропометрія та інші на практиці використовуються лише для якісних характеристик їх поточного стану. Можливість математичного аналізу фізичної взаємодії фізіологічних структур щелепи та кінцівок людини, що пов'язані з поточним станом біологічного об'єкту (кісток, м'язів, зв'язок та інших структур) і побудови імітаційних біомеханічних моделей лежить за межами знань лікарів, але вона також недоступна фахівцю, який володіє фізико-математичним апаратом без медичних знань.

Розв'язання практичних і теоретичних проблем біомеханіки кісток кінцівок та щелепи людини з пошкодженнями необхідне для знаходження ефективних способів відновлення функціональності даних органів та пов'язано з імітаційним моделюванням напружено-

деформованого стану (НДС) сполучених структурних елементів біомеханічних систем (БС) різного фізичного походження (біологічних тканин, лікувальних пристроїв для блокуючого або коригуючого компресійного остеосинтезу частин кісток, засобів імплантації [1-13].

Більшість методів наукового дослідження БС [базується на ідеї використання імітаційного моделювання, як розрахунково-теоретичного апарату, що здебільшого використовує математичні (аналітичні, комп’ютерні) моделі [1], так і експериментального напрямку, що застосовують предметні (фізичні, біологічні) моделі. Прогрес інформаційних технологій зумовив появу нового напрямку - комп’ютерного моделювання, що якісно змінило методологію досліджень БС.

Сучасні комп’ютерні технології дозволяють створювати моделі надзвичайної складності та забезпечити високу ступінь деталізації та точність розрахунків [1-17]. Комп’ютерне імітаційне моделювання в медицині, почало інтенсивно розвиватися наприкінці 80-х років 20-го століття, здебільшого, як метод наукових досліджень. Однак досягнення в цьому напрямку виявились настільки значними, що на сьогоднішній день ми стаємо свідками революційних змін, пов’язаних із широким впровадженням комп’ютерних технологій в медичну практику. Результатом застосування яких є не тільки поява нових методів планування та реалізації хірургічних втручань, а і взаємодія фахівців різних галузей для досягнення необхідного результату лікування.

Сучасні дослідження біомеханічних систем широко використовують томографічне обладнання. Вперше запропонований Алланом Кормаком і Годфрі Хаунсфільдом у 1972 році, метод комп’ютерної томографії дозволив отримувати зображення структур живого організму в залежності від ослаблення рентгенівського випромінювання щільністю біологічних тканин. Основними різновидами даного обладнання є магніто-резонансна томографія (МРТ), об’єктом використання якої є м’які структури живого організму, та комп’ютерна томографія (КТ), розроблена для відтворення знімків кісткових щільних структур. Томографічні сканери дуже поширені в медицині, це дороге обладнання виготовляється кращими компаніями світу, які спеціалізуються на виготовленні електронних пристроїв (Siemens, Philips, Hitachi, General Electric, Toshiba, та ін.).

Окрему увагу в даний час привертають методи та програмне забезпечення для опрацювання знімків КТ/МРТ для відтворення реалістичних комп’ютерних моделей просторової та об’ємної геометрії об’єктів дослідження біомеханічних структур. Принцип дії оснований на опрацюванні послідовності знімків КТ/МРТ, створенні єдиної хмари точок, застосуванні інтерполяційних алгоритмів для формування поверхневого шару просторової геометрії та об’єму елементів біологічних структур. Вхідними даними є комп’ютерні формати зображень з полями точок (більшості випадків DICOM – стандарт сканерів КТ/МРТ для передачі даних). Серед існуючих варіантів програмного забезпечення можна виділити Materialize Mimics, Simplant, 3D-Doctor.

Великий внесок при створенні комп’ютерних моделей біомеханічних систем відіграють володіння інструментами інженерного CAD моделювання. Сучасні програмні комплекси Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA є досить зручними при вирішенні задач таких як: – створення реалістичних “збірок” елементів конструкцій біомеханічного походження; – створення штучних переломів та розташування кісткових відламків; – створення та позиціонування елементів остеосинтезу та імплантатів.

Для досягнення передбачуваних результатів при моделюванні напружено-деформованого стану біомеханічних систем з ушкодженими структурами та апаратами фіксації кісткових відламків або імплантами важливим кроком є встановлення та використання достовірних механічних властивостей матеріалів. Дані знання мають велике значення на розподіл, концентрації, пікові величини напружень і як наслідок, оцінка

результатів дослідження запасів статичної, динамічної міцності біомеханічних систем багато залежить від досвіду дослідження властивостей біологічних структур.

Механічні властивості кісток людини є неоднорідними, нелінійними і анізотропними, мають виражені в'язко-пружні властивості і здатність до структурної перебудови під дією навантажень. Результати досліджень показують, що механічні властивості кісток людини можуть суттєво (на порядок і більше) змінюватись в залежності від віку, статі, структурно-функціонального стану кісткової тканини, наявності локальних і системних патологічних процесів та механічних пошкоджень. Структурна організація кісток має яскраво виражені лінії жорсткості, вздовж яких матеріал має максимальні міцнісні характеристики [1].

Дослідження механічних властивостей кісток були розпочаті понад 100 років тому. Через складність та/або неможливість проведення натурних експериментів, історично перші дослідження проводились для взірців кісток тварин та трупних кістках людини. Такі обмеження хоча і не давали повної картини про біомеханічні властивості живої тканини людини, але мали фундаментальний характер про пізнання нового матеріалу, який порівнювався з відомими конструкційними матеріалами (металами, композитами, полімерами, тощо). В основі дослідження механічних властивостей кісткової тканини лежать різноманітні статичні та динамічні випробування їх зразків [1, 19].

Силові навантаження кісток людини представляють собою складний циклічний процес. Фізіологічно можливі варіанти силового навантаження кісток людини, що можуть бути визначені методами гнатодинмометрії та на основі експертних оцінок, характеризується деформаціями розтягу-стиску, зсуву, згину та кручення, що приводять до складного виду напружено-деформованого стану кістки.

Розв'язок прикладних задач теорії пружності та в'язкопружності для контактуючих тіл з рухливими поверхнями та конструкцій з ушкодженими біологічними структурами і апаратами фіксації кісткових відламків або імплантатами в актуальних проблемах біомеханіки виконується з використанням проєкційно-сіткових чисельних методів в формі скінченних елементів та скінченних різниць. Програмне забезпечення – CAE системи. Сучасні комерційні програмні комплекси Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA, ANSYS, NASTRAN є досить зручними при виконанні чисельних розв'язків задач даного типу, в тому числі для створення "реалістичних" збірок елементів конструкцій біомеханічного походження; створення штучних переломів та розташування кісткових відламків; створення та позиціонування елементів остеосинтезу та імплантатів.

Дослідження біомеханічних систем, що наведені в роботі виконані з використанням сучасних інформаційних технологій і CAD/CAM/CAE систем, програм спеціального призначення та власних розробок додаткових програмних модулів (рис.1).

Розробка даної тематики здійснювалася відповідно до наукових планів і науково-технічних програм: кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів (ДММ та ОМ), науково-дослідної лабораторії (НДЛ) "Математичного моделювання в механіці суцільних середовищ" та лабораторії експериментальної біомеханіки механіко-машинобудівного інституту (ММІ) "КПІ ім. Ігоря Сікорського" з 2009р по 2018р; держбюджетних НДР "Розробка та впровадження систем остеосинтезу підвищеної ефективності для хірургічного лікування складних переломів кісток людини" та "Розробка та впровадження нових способів натурального та комп'ютерного контролю параметрів надійності біомеханічних систем з пошкодженими кістками людини", договорів про спільну науково-дослідну діяльність між "КПІ ім. Ігоря Сікорського", НДЛ кафедри ДММ та ОМ, ММІ та Інституту ортопедії та травматології Академії медичних наук України (лабораторією біомеханіки), Української військово - медичної академії (кафедра військової хірургії), кафедрою стоматології післядипломної освіти Ужгородського національного університету, кафедрою щелепно-лицьової хірургії Національного медичного університету ім. О.О.Богомольця; Інститутом

стоматології Національної медичної академії післядипломної освіти імені П.Л. Шупика, Запорізького державного медичного університету, Донецького національного медичного університету.



Рис. 1. Інформаційні технології та системи для комп'ютерного тестування несучої спроможності біомеханічних конструкцій як систем контактуючих неоднорідних тіл з ушкодженими біологічними структурами

Розроблені методики, алгоритми, інформаційні технології та зазначене вище програмне забезпечення використовувалось при підготовці та публікації наукових праць зі співробітниками провідних медичних закладів України, підготовці та захисту кандидатських та магістерських дисертацій здобувачів вищої освіти кафедри ДММ та ОМ та магістрантів кафедри за програмою подвійного диплому НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” та Познаньського університету технологій, Республіка Польща.

Список літератури

- Маланчук В.О. Імітаційне комп'ютерне моделювання в щелепо-лицевій хірургії. / В.О. Маланчук, М.Г. Кришук, А.В. Копчак. // – К.: Видавничий дім "Асканія", 2013. – 231 с.
- Мищенко О.Н., Копчак А.В., Кришук Н.Г., Скиба І.А., Черногорський Д.М. Имитационное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния систем «имплантат-кость» при применении имплантатов из циркониевых сплавов. Республика Беларусь, Современная стоматология. 2017, – №2, с. 62-68
- Palyvoda R., Malanchuk V., Kryshchuk N., Volovar O. Tree-dimensional computer modelling and stress-strain analysis of temporomandibular joint. EUREKA: Health Sciences», 2016, № 2, p.11-16
- Кришук М.Г., Бурьянов О. А., Єщенко В. О. Аналіз напружено-деформованого стану хрящів суглобу при ушкодженнях зв'язок наколінка та різних геометричних формах контактної поверхні кістки стегна. Літопис Травматології та Ортопедії, 2016 № 1-2, 38-41
- Єщенко В. О., Кришук М. Г. Біомеханіка компресійного металоостеосинтезу кісткових відламків нижньої щелепи модельованими пластинами, Літопис Травматології та Ортопедії, 2016, № 1-2, с. 28-31
- Копчак А.В., Скиба І.А., Кришук М.Г., Романова А.Ю., Іщенко О.А. Особливості напружено-деформованого стану системи фіксатор-кістка при остеосинтезі нижньої щелепи пластинами з -Zr-Ti-Nb сплаву. Літопис травматології та Ортопедії, 2016, №1, с. 75-82
- Лисенко Р.Б., Кришук М.Г. Аналіз деформацій, напружень, біомеханічної взаємодії імплантату і м'язово-апоневротичних структур передньої черевної стінки людини при алопластиці з приводу її дефектів. Хірургія України, 2016, №3(59), с. 50-55
- Кришук М.Г., Бурьянов О.А., Єщенко В.О Аналіз напружено-деформованого стану хрящів суглобу при ушкодженнях зв'язок наколінка та різних геометричних формах контактної поверхні кістки стегна Літопис травматології та Ортопедії, 2016 № 1-2, с. 38-41

17. Кришук М.Г., Копчак А.В., Єщенко В.О. Параметри надійності біомеханічних систем з ушкодженими кістками людини. Літопис Літопис травматології та ортопедії, 2014, №1-2 (29-30), с. 69-71
18. Лазарев І.А., Костогриз О.А., Кришук М.Г., Скибан М.В. Концептуальна біомеханічна модель виникнення структурних змін у тібіофemorальній ділянці колінного суглоба при травмі. Журнал "Травма", №4 (том 15), 2014р, с. 11-12
19. Кришук М.Г., Лисенко А.В. Біомеханіка передньої черевної стінки людини з імплантатами при функціональних навантаженнях. Вісник травматології та ортопедії, 2014, №1-2 (29-30), с. 69-71
20. Кришук Н.Г., Копчак А.В. Розподіл напружень у системі «фіксатор-кістка» при проведенні остеосинтезу нижньої щелепи накістковими міні-пластинами. Український журнал хірургії, №1, 2014, с.44-49
21. Lysenko R., Kryshchuk M. Simulation computer modelling of biomechanics of anterior abdominal wall. The World Journal of Hernia and Abdominal Wall Surgery. International Review of Education and Science / №1 (8), January-June, 2015, Volume II, Suppl 2, с. 194-195
22. Лисенко Р.Б., Кришук М.Г. Можливості 3D інформаційних технологій для обґрунтування оптимальних методів відновлення функціональності біомеханічних систем передньої черевної стінки людини. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології в алопластичній та лапароскопічній хірургії гриж живота», НМАПО ім. П.Л. Шупика, 2019, с. 57-59
23. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=kpVndnYAAAAAJ&hl=ru&oi=sra>
24. Пат. № 75393 України "Спосіб створення індивідуальної імітаційної моделі напружено-деформованого стану нижньої щелепи" / Маланчук В.О., Кришук М.Г., Копчак А.В., Єщенко В.О. / Заявл. 06.02.2012., Опубл. 26.11.2012, Бюл.№ 22.– 5 с.
25. Авт. свідоцтво № 68170 України "Спосіб високоточної багатовимірної віртуальної імітації будови та функції зубощелепного апарату людини, ортодонтичних апаратів, ортопедичних конструкцій зубних протезів, шин, шин-протезів, імплантатів та їх протетичних елементів з метою експериментального моделювання їх функціонування" / Леоненко П.В., Леоненко Г.П., Кришук М.Г., Єщенко В.О. / Заявл. 29.12.2011, Опубл. 12.03.2012, Бюл.№ 5– 7 с.
26. Пат. № 139586 України "Спосіб визначення положення фіксації шини на травмованих зубах у дітей" / Яковенко Л. М., Ковтун Т.О., Кришук М.Г. / Заявл. 21.06.2019, Опубл. 10.01.2020, Бюл.№ 1 – 5с
27. Експериментальні дослідження засобів остеосинтезу. Монографія за ред. Шидловського М.С, Лакши А.М. - К.: Ленвіт, 2017. - 277 с.

Information technologies and systems of computer testing bearing capacity of biomechanical constructions of metal osteosynthesis

Kryshchuk M., Ieshchenko V.

Abstract. The description of information technologies and systems CT/CAD/CAM/CAE that are used in the finite element solution algorithms of applied contact mechanics problems for biomechanical osteosynthesis systems with damaged bones of the jaw and limbs of a person is presented. Reproduction of topological data of the structure of inhomogeneous structures of biological objects, elastically or viscoelastically deforming is carried out on the tomographic data of X-ray density in the DICOM format. Technical characteristics of structural elements of technological origin, medical devices, implants are used to reproduce their geometry in CAD systems. The developed algorithms are presented on the example of creating a generalized mathematical model of the stress-strain state of biomechanical systems using the SAE code of systems and proprietary applications to determine their functional reliability. In computational and experimental studies, the Fujii Prescale Photo Film films are used to calculate the forces and areas of contact pressures. The application of information technologies and systems is shown on examples of solving actual applied problems of the biomechanics of metal osteosynthesis and biomechanical systems of the human anterior abdominal wall. The introduction of information technology in the medical practice of computer testing of bearing capacity of biomechanical structures allows for improved diagnostics of biological tissues in areas of injuries and fractures, provide rational methods of osteosynthesis through the use of biomechanically sound treatment strategies and reduce the duration of temporary disability.

Keywords: Biomechanics, information technologies and systems, simulation model, numerical experiment, biomechanical system, mechanical characteristics, anisotropic materials, bones, jaw, ending, damage, stresses, deformations, relaxation, bearing capacity