

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІКИ ШТУЧНОГО КОЛІННОГО СУГЛОБА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто ключові аспекти оптимізації механіки штучного колінного суглоба з метою покращення функціональних результатів та підвищення задоволеності пацієнтів після ендопротезування. Проаналізовано сучасні напрямки вдосконалення, включаючи дизайн імплантатів для відтворення природної кінематики, інноваційні матеріали та покриття для підвищення довговічності та біосумісності, удосконалення хірургічних технік для точності та балансу, персоналізацію в ендопротезуванні та роль комп'ютерного моделювання і робототехніки. Обговорено досягнуті результати, клінічне значення оптимізованої механіки, а також невирішені проблеми та перспективи подальших досліджень у цій галузі.

Ключові слова: ендопротезування колінного суглоба, штучний колінний суглоб, біомеханіка, кінематика, оптимізація, дизайн імплантатів, матеріали для імплантатів, хірургічні техніки, персоналізована медицина, комп'ютерне моделювання, робототехніка.

Annotation

This work examines the key aspects of optimizing the mechanics of artificial knee joints to improve functional outcomes and patient satisfaction after arthroplasty. Current areas of improvement are analyzed, including implant design to replicate natural kinematics, innovative materials and coatings to enhance durability and biocompatibility, refinement of surgical techniques for precision and balance, personalization in arthroplasty, and the role of computer modeling and robotics. The achieved results, clinical significance of optimized mechanics, as well as unresolved problems and prospects for further research in this field are discussed.

Keywords: total knee arthroplasty, artificial knee joint, biomechanics, kinematics, optimization, implant design, implant materials, surgical techniques, personalized medicine, computer modeling, robotics.

Вступ

Ендопротезування колінного суглоба (ЕКС) є визнаним та ефективним методом лікування пацієнтів з термінальними стадіями дегенеративно-дистрофічних захворювань, що дозволяє суттєво зменшити больовий синдром та покращити якість життя. [1] Однак, незважаючи на значні успіхи, до 20% пацієнтів висловлюють незадоволення результатами операції, часто пов'язане з відчуттям "неприродності" суглоба та обмеженнями функціональності порівняно зі здоровим коліном. [2] Це вказує на наявність значного потенціалу для подальшої оптимізації. Основними причинами невдач ЕКС та необхідності ревізійних втручань є інфекційні ускладнення, нестабільність компонентів, їх асептичне розхитування та розвиток тугорухливості. [3] Механічні проблеми, такі як знос поліетиленового вкладиша, неоптимальне позиціонування компонентів ендопротеза та порушення балансу зв'язкового апарату, відіграють у цьому ключову роль. Важливо зазначити, що незадоволеність пацієнтів та висока частота ревізійних операцій є не лише клінічними викликами, але й створюють значний економічний тягар для систем охорони здоров'я, оскільки ревізійні втручання є складнішими, дорожчими та часто асоціюються з гіршими функціональними результатами. Таким чином, оптимізація механіки штучного колінного суглоба спрямована не тільки на покращення індивідуальних клінічних результатів, але й на підвищення загальної економічної ефективності ЕКС.

Головною метою оптимізації механіки штучного колінного суглоба є максимальне наближення його біомеханічних характеристик до фізіологічної норми здорового коліна, прагнучи до створення так званого "забутого суглоба". [4] Це включає завдання з покращення кінематики (відтворення природних рухів) та кінетики (розподіл навантажень), зменшення зносу компонентів, підвищення стабільності ендопротеза, забезпечення його довготривалої та надійної фіксації, що в сукупності має призвести до покращення функціональних результатів та підвищення рівня задоволеності пацієнтів.

Напрямки Оптимізації Механіки Штучного Колінного Суглоба

Покращення дизайну імплантатів: відтворення природної кінематики.

Еволюція дизайну ендопротезів колінного суглоба пройшла шлях від простих шарнірних конструкцій до складних багатокомпонентних систем, які прагнуть відтворити комплексну тривимірну кінематику природного коліна, що включає поліцентричне обертання, трансляцію та ротацію.[5] Сучасні розробки зосереджені на імплантатах з асиметричною геометрією суглобових поверхонь, наприклад, дизайни з медіальним pivot-механізмом, які забезпечують медіальну стабільність та контрольовану латеральну рухливість, що більше відповідає фізіологічному руху.[6] Високофлексійні (high-flexion) дизайни теоретично дозволяють збільшити амплітуду рухів, однак їх клінічні переваги та довгострокові ризики все ще потребують ретельного вивчення.[7] Існують різні концепції стабілізації: круціат-зберігаючі (CR), задньо-стабілізовані (PS) та бікруціат-стабілізовані (BCS) дизайни, кожен з яких має свої особливості у відтворенні функції зв'язкового апарату.[2] Дослідження показують, що BCS ендопротези можуть забезпечувати кінематику, ближчу до нормальної, в ранній та пізній фазах згинання, але можуть мати обмеження в середній фазі.[8-9] Модульність компонентів, таких як аугменти та подовжувачі ніжок, дозволяє краще адаптувати імплантат до індивідуальних анатомічних особливостей та наявних кісткових дефектів, що особливо важливо при ревізійних операціях.[9-10] Спостерігається чітка тенденція переходу від універсальних дизайнів до більш анатомічно-орієнтованих та функціонально-адаптованих імплантатів. Цей рух зумовлений розумінням того, що саме відхилення від природної кінематики, характерні для ранніх моделей ендопротезів (наприклад, парадоксальний передній зсув стегнової кістки [11]), є однією з ключових причин незадовільних функціональних результатів та відчуття "штучності" суглоба після ЕКС. [3]

Інноваційні матеріали та покриття: підвищення довговічності та біосумісності

Значний прогрес досягнуто у розробці матеріалів для компонентів ендопротезів. Високомолекулярний поліетилен (UHMWPE) та його вдосконалені модифікації, зокрема високо-зшитий поліетилен (HXLPE), демонструють значно нижчий рівень зносу, що зменшує ризик остеолізу, спричиненого частками зносу.[5] Зменшення зносу поліетилену безпосередньо впливає на зниження ризику асептичного розхитування, оскільки саме частки зносу є тригером запальної реакції та подальшого остеолізу.[12] Це не лише подовжує термін служби імплантату, але й зменшує потребу в ревізійних операціях. Керамічні матеріали, такі як оксид цирконію (OxZr) та оксид алюмінію, використовуються для створення пар тертя з низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю.[5] Титанові сплави та тантал широко застосовуються завдяки їх біосумісності та здатності до остеointegraції, особливо при використанні пористих структур.[5] Біоактивні покриття, наприклад, гідроксиапатит (HA) або біоскло, наносяться на поверхню імплантатів для стимуляції остеointegraції та покращення фіксації до кісткової тканини.[13-15] Антибактеріальні покриття, що містять іони срібла або антибіотики, розробляються для зниження ризику перипротезної інфекції.[5] Важливо відзначити, що незважаючи на основний фокус на зносі поліетилену, вивільнення іонів металів (Co, Cr, Mo, Ti) з металевих компонентів також є значущим фактором, який може мати клінічні наслідки, особливо для пацієнтів з підвищеною чутливістю до металів.[16] Це підкреслює важливість розробки неметалевих альтернатив або ефективних бар'єрних покриттів для мінімізації будь-яких потенційно шкідливих продуктів з усіх компонентів імплантату.

Удосконалення хірургічних технік: точність та баланс

Оптимізація хірургічних технік спрямована на досягнення точного позиціонування компонентів, відновлення фізіологічної осі кінцівки та адекватного балансу м'яких тканин. Існують різні підходи до резекції кістки, зокрема, техніка виміряної резекції (measured resection) та техніка збалансування проміжків (gap balancing), а також їх гібридні варіанти. Виміряна резекція базується на анатомічних орієнтирах, тоді як збалансування проміжків пріоритезує досягнення рівномірного натягу зв'язок у згинанні та розгинанні.[1] Кінематичне вирівнювання (Kinematic Alignment - KA) є альтернативою традиційному механічному вирівнюванню (Mechanical Alignment - MA) і має на меті відновити індивідуальну доартрозну вісь суглоба пацієнта.[4] Цей підхід відображає фундаментальний зсув у філософії ЕКС – від прагнення до універсальної "ідеальної" нейтральної осі до визнання важливості індивідуальної анатомії для досягнення оптимальної функції. KA потенційно забезпечує більш природну кінематику та кращі функціональні результати, вимагаючи менше втручання у м'які тканини.[3] Точне відновлення ротації компонентів та балансу м'яких тканин є критично важливим для функції надколінника та загальної стабільності суглоба.[1]

Персоналізація в ендопротезуванні: індивідуальний підхід

Персоналізований підхід в ЕКС передбачає використання пацієнт-специфічних інструментів (PSI) та індивідуально виготовлених імплантатів (custom-made implants), розроблених на основі передопераційних даних комп'ютерної (КТ) або магнітно-резонансної (МРТ) томографії пацієнта.[16] Переваги такого підходу включають потенційно точніше позиціонування компонентів, краще прилягання імплантату до кісткової тканини, а також можливе зменшення часу операції та інтраопераційної крововтрати.[17] Клінічні дослідження вказують на можливе покращення функціональних результатів та підвищення задоволеності пацієнтів при використанні персоналізованих рішень. Технологія 3D-друку активно використовується для виготовлення індивідуальних шаблонів для резекції кістки, а в деяких випадках і самих імплантатів, особливо при наявності значних кісткових дефектів. Системи, такі як Persona Knee System, пропонують розширені опції розмірів та анатомічно адаптовані компоненти для кращого відтворення природної кінематики.[12] Ефективність персоналізованого підходу залежить від точності на всіх етапах: від збору даних та планування (з використанням комп'ютерного моделювання) до виготовлення (з використанням 3D-друку та відповідних матеріалів) та хірургічної реалізації (з можливою підтримкою навігаційних або роботизованих систем). Незважаючи на загальні переваги, існують певні занепокоєння щодо деяких типів персоналізованих імплантатів; наприклад, повідомлялося про відносно високу частоту асептичного розхитування стегнового компонента при пацієнт-специфічному однополюсному ендопротезуванні. Це вказує на те, що деталі дизайну навіть у кастомних імплантатах мають вирішальне значення і потребують подальших досліджень.

Роль комп'ютерного моделювання та робототехніки в оптимізації

Комп'ютерне моделювання та робототехніка трансформують ЕКС, перетворюючи його з процедури, що значною мірою покладається на досвід хірурга, на більш науково обґрунтований та керований даними процес. Аналіз методом скінчених елементів (FEA) використовується для оцінки напружено-деформованого стану кісткових тканин та компонентів імплантату, прогнозування зносу, оптимізації дизайну та хірургічних технік.[14] Моделювання багатотілової динаміки (MBD) дозволяє аналізувати кінематику та кінетику суглоба in vivo.[11] Обчислювальна гідродинаміка (CFD) застосовується для моделювання процесів змащення в штучних суглобах. Комп'ютерна навігація (CAS) та робот-асистовані системи (RA-ТКА) підвищують точність резекції кістки, позиціонування імплантатів та балансування м'яких тканин. RA-ТКА може сприяти зменшенню післяопераційних ускладнень та тривалості госпіталізації, а також покращенню точності вирівнювання.[15] Ці технології дозволяють проводити доклінічну оптимізацію та підвищувати передбачуваність результатів хірургічного втручання.

Висновок

Досягнуто значного прогресу в розумінні біомеханіки колінного суглоба, розробці нових матеріалів та впровадженні технологій для підвищення точності хірургічних втручань та персоналізації лікування. Проте, досягнення "забутого суглоба" для всіх пацієнтів залишається складним завданням.3 Невирішеними питаннями є довготривала виживаність нових імплантатів, оптимізація для специфічних груп пацієнтів, подальше зниження ризику ускладнень та економічна ефективність новітніх розробок.9 Існує певний розрив між технологічним потенціалом (наприклад, повне відтворення індивідуальної кінематики) та тим, що рутинно досягається в клінічній практиці. Подолання цього розриву вимагає не тільки подальших технологічних інновацій, але й кращого розуміння біологічних реакцій організму на імплантат.

Майбутні напрямки досліджень включають розробку "розумних" імплантатів, здатних адаптуватися до навантажень або вивільняти терапевтичні агенти; інтеграцію штучного інтелекту в передопераційне планування та інтраопераційну навігацію; розвиток регенеративних підходів; проведення довгострокових досліджень нових технологій; та поглиблене вивчення взаємодії "імплантат-організм" на клітинному та молекулярному рівнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Total Knee Replacement Techniques - StatPearls - NCBI Bookshelf, 20, 2025, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538208/>
2. Comparison of in vivo knee kinematics before and after bicruciate 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8436441/>
3. The Future of TKA - Personalized Hip and Knee Joint Replacement, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK565763/>
4. Kinematic alignment in total knee arthroplasty - <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7407864/>
5. The Best Latest Innovations in Knee Implant Materials for, <https://plancherortho.com/the-best-latest-innovations-in-knee-implant-materials-for-arthroplasty/>
6. - Ревізійне ендопротезування кульшового та колінного суглобів - Клініка Angelholm, https://angelholm.ua/uk/services/reviziine_endoprotezuвання_kulshovogo_ta_kolinnogo_suglobiv_4/
7. Early mechanical failure in total knee arthroplasty , <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2219938/>
8. Failure After Modern Total Knee Arthroplasty: A Prospective Study of, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5794604/>
9. Future directions in knee replacement - PubMed, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20408486/>
10. Evolution of TKA design - PMC, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6178992/>
11. Knee Joint Biomechanics in Physiological Conditions and How <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7160724/>
12. Differences in kinematics and kinetics during gait between total knee, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39667041/>
13. In Vivo Kinematic Comparison of a Bicruciate Stabilized Total Knee, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29066105/>
14. A Review on Biomaterials for Orthopaedic Surgery and <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9145924/>
15. Bioactive Coatings for Orthopaedic Implants—Recent Trends in Development of Implant Coatings - PMC, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4139820/>
16. Wear in total knee arthroplasty—just a question of polyethylene 5, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3923952/>
17. Номер № 3-4 (13-14) 2018 - Застосування імплантатів з покриттям матеріалом на основі біоактивного скла у пацієнтів після видалення пухлин кісток, доступ отримано травня 20, 2025, <https://tf-g.com.ua/info/articles/zastosuvannya-implantativ-z-pokrittyam-materialom-na-osnovi-bioaktivnogo-skla-u-patsijentiv-pislya-vidalennya-puhlin-kistok.html>

Сидорук Олег Олександрович - аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Коваль Леонід Григорович** - к.т.н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Oleh Oleksandrovych Sydoruk - graduate student gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Koval Leonid Hryhorovych - Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia