



УДК 617-089.844:611.7:620.1

DOI:10.34142/nc.2025.3.69

Доцільність вивчення біомеханіки матеріалів для протезування та ортезування кінцівок та хребта

*Микола Литвиненко,
Любов Рисована,
Вікторія Григорук,
Роман Алексеєнко,
Світлана Гранкіна*

У сучасній медичній практиці протезування та ортезування посідають ключове місце у відновленні функціональної активності пацієнтів із патологіями або травмами опорно-рухового апарату. Щорічно мільйони людей по всьому світу стикаються з необхідністю використання ортопедичних пристроїв після ампутацій, дегенеративних уражень суглобів, травм хребта чи неврологічних порушень, що впливають на рухливість. У цьому контексті критично важливим є не лише вдосконалення конструкцій протезів та ортезів, але й глибоке розуміння біомеханічних властивостей матеріалів, з яких вони виготовляються [1, 2].


Біомеханіка матеріалів є міждисциплінарною галуззю, що поєднує знання з медицини, інженерії, фізики та матеріалознавства. Вона дозволяє оцінити,

яким чином матеріали взаємодіють із біологічними структурами, витримують навантаження та сприяють відновленню функцій [3, 4]. Наприклад, вибір надто жорсткого або, навпаки, надто еластичного матеріалу може спричинити додаткові травми, знизити ефективність пристрою або викликати біль і дискомфорт у пацієнта. Натомість, адекватна біомеханічна адаптація матеріалів сприяє зменшенню енергозатрат при ходьбі, поліпшенню стабільності опори, зменшенню вторинних ускладнень (як-от остеоартроз суміжних суглобів) та підвищенню загальної якості життя.

Сучасні технології виготовлення ортопедичних пристроїв пропонують широкий спектр матеріалів — від класичних металів (титан, нержавіюча сталь) до високотехнологічних полімерів, вуглецевих



композитів і термопластиків [5]. Проте їх ефективність у клінічному застосуванні визначається не лише фізичними властивостями, але й здатністю гармонійно інтегруватись у біомеханіку людського тіла [6, 7]. Це потребує залучення медичних фахівців до процесу відбору матеріалів, їхнього тестування, моделювання навантажень та врахування індивідуальних анатомо-функціональних особливостей пацієнтів.

 тже, актуальність вивчення біомеханіки матеріалів у сфері протезування та ортезування зростає разом із запитом на індивідуалізовані, легкі, довговічні та адаптивні рішення. Це не лише питання інженерного підходу, а й клінічного мислення — інтеграція матеріалознавства у повсякденну практику лікарів, фізичних терапевтів і ортопедів здатна суттєво покращити результати лікування та реабілітації.

Метою дослідження є комплексне наукове обґрунтування доцільності вивчення біомеханіки матеріалів, які застосовуються у сучасному протезуванні та ортезуванні кінцівок і хребта. У центрі уваги перебуває не лише вивчення фізико-механічних властивостей таких матеріалів, як титан, вуглецеве волокно, полімери високої щільності та термопластики, але й аналіз їхнього клінічного значення для забезпечення ефективної реабілітації пацієнтів.

Дослідження спрямоване на виявлення зв'язку між біомеханічними характеристиками матеріалів і їх здатністю до інтеграції з анатомо-функціональною структурою людського тіла. Особливий акцент зроблено на розуміння того, як жорсткість, еластичність, стійкість до зношування та здатність поглинати енергію впливають на ефективність ортопедичних конструкцій у динамічних умовах — під час ходьби, навантаження на суглоби, змін положення тіла.

Крім того, мета дослідження полягає у тому, щоб показати важливість мультидисциплінарного підходу до вибору та моделювання ортопедичних пристроїв. Співпраця між лікарями, фізичними тера-

певтами, біомеханіками та інженерами дозволяє забезпечити не лише конструктивну точність, але й клінічну доцільність та індивідуальну адаптацію пристроїв до потреб конкретного пацієнта.

Одним із завдань є окреслення перспективних напрямів розвитку в цій галузі, зокрема використання новітніх технологій 3D-друку, впровадження сенсоризованих протезів та інтелектуальних ортезів, що реагують на зміну навантаження в реальному часі. Отримані результати мають сприяти не тільки науковому розумінню теми, але й практичному вдосконаленню реабілітаційних рішень у повсякденній клінічній практиці.

У процесі підготовки цієї роботи було застосовано комплексний аналітичний підхід, що охоплює як теоретичне, так і практичне вивчення питання. Основним методом стала систематизація та критичний аналіз сучасної наукової літератури з відкритих медичних баз даних, зокрема PubMed, Scopus, ScienceDirect та Google Scholar [2, 4, 8 — 15]. Було відібрано рецензовані публікації за останні десять років, присвячені дослідженням біомеханіки матеріалів, що використовуються в ортопедичній практиці, а також клінічним спостереженням за результатами протезування та ортезування. Особливу увагу приділено статтям, які оцінюють взаємозв'язок між фізико-механічними властивостями матеріалів і клінічними показниками функціонального відновлення пацієнтів.

Крім того, до аналізу було включено дані клінічних кейсів з практики спеціалізованих реабілітаційних центрів, де здійснюється виготовлення та підбір ортопедичних засобів. Розглядалися реальні приклади застосування різних типів матеріалів — таких як титан, вуглецеве волокно, поліетилен високої щільності, поліпропілен та полікарбонат — у виготовленні протезів верхніх і нижніх кінцівок, а також ортезів для стабілізації хребта [9, 12, 14 — 17].

Методологія дослідження включала порівняльну оцінку фізичних власти-

востей зазначених матеріалів на основі вже існуючих експериментальних даних. Аналізувались показники жорсткості, еластичності, опору до втоми, стійкості до деформації та біосумісності. Додатково було розглянуто взаємодію цих матеріалів з м'якими тканинами, вплив на комфорт пацієнта при тривалому носінні, а також їх вплив на біомеханіку руху під час щоденної активності [18 — 23].

Тобто, дослідницький підхід був спрямований не лише на теоретичне узагальнення, але й на практичне співставлення властивостей матеріалів із клінічними результатами. Це дозволило сформулювати більш цілісне уявлення про роль біомеханіки в підборі матеріалів для протезування та ортезування й окреслити фактори, що безпосередньо впливають на функціональність і адаптивність ортопедичних пристроїв.

Аналіз сучасної літератури, а також узагальнення даних клінічних спостережень дозволили встановити чіткий взаємозв'язок між біомеханічними характеристиками матеріалів, які використовуються у протезуванні та ортезуванні, та функціональними результатами, що демонструють пацієнти в післяопераційний і реабілітаційний періоди. Найбільш переконливі результати спостерігались при застосуванні композитних матеріалів, зокрема вуглецевого волокна, у протезуванні нижніх кінцівок. У пацієнтів, які користувались такими протезами, відзначено покращення енергозбереження при ходьбі, зменшення навантаження на контралатеральну кінцівку та загальне підвищення витривалості в динамічних навантаженнях. За даними досліджень, опублікованих у *Journal of Prosthetics and Orthotics* [24], застосування карбонових матеріалів знижує витрати енергії під час амбулаторного пересування на 12 — 18 % порівняно з традиційними матеріалами.

Протези із титану, які застосовуються переважно в суглобовому ендопротезуванні, демонструють високу міцність та стійкість до корозії, що забезпечує довготривалу експлуатацію без значного зносу.

Біосумісність титану є однією з найвищих серед усіх металевих матеріалів, що підтверджується низьким рівнем запальних реакцій і відторгнення в постопераційному періоді, що описано в клінічних звітах *European Spine Journal* [25].

При виготовленні ортезів для хребта та верхніх кінцівок особливою ефективністю показали термопластики — такі як поліпропілен і полікарбонат. Ці матеріали мають здатність до термоформування, що дозволяє точно моделювати ортез відповідно до анатомічних контурів пацієнта. Завдяки цьому досягається не лише стабілізація ураженого сегмента, але й зниження ймовірності утворення пролежнів чи стискання м'яких тканин. Клінічні дані свідчать про підвищення комплаєнтності пацієнтів, які користуються індивідуально підібраними термопластичними ортезами, у порівнянні зі стандартними фабричними моделями.


Окремо варто відзначити роль поліетилену високої щільності у забезпеченні гнучкості та амортизації у динамічних ортезах. Його використання зменшує травматизацію шкіри при довготривалому носінні, що особливо важливо у пацієнтів з неврологічними порушеннями та підвищеною чутливістю тканин [26].

Узагальнення наведених результатів дає підстави стверджувати, що вибір матеріалу безпосередньо впливає на ефективність ортопедичного втручання, рівень адаптації пацієнта, комфорт під час використання пристрою та тривалість його служби. Водночас, за відсутності уніфікованих протоколів вибору матеріалів, вирішальну роль відіграє мультидисциплінарний підхід та клінічне мислення фахівців, залучених до процесу проектування протезів і ортезів.

Результати дослідження підтверджують, що вибір матеріалів для виготовлення ортопедичних пристроїв має вирішальне значення для досягнення оптимальних клінічних результатів у пацієнтів із порушеннями опорно-рухового апарату. Біомеханічна відповідність матеріалу функціональним потребам

пацієнта забезпечує не лише кращу адаптацію до протезів чи ортезів, а й мінімізує ризики ускладнень, зменшує час реабілітації та покращує загальну якість життя. У контексті клінічної практики це означає необхідність ретельного підходу до підбору матеріалів, що виходять за рамки стандартних технічних характеристик і враховують індивідуальні анатомічні, функціональні та навіть психоемоційні особливості пацієнта.

Застосування матеріалів із високою еластичністю та низькою питомою вагою, таких як вуглецеве волокно, особливо актуальне для протезування нижніх кінцівок, де навантаження під час ходьби є найбільш інтенсивними. Такі матеріали не тільки дозволяють відновити рухову активність, а й зменшують втомлюваність, що є критично важливим для пацієнтів із частковою втратою опори. У свою чергу, титан, незважаючи на свою відносно велику вагу, демонструє унікальну довговічність і біосумісність, що робить його ідеальним для ендопротезування великих суглобів, зокрема кульшового та колінного [3, 7, 16].

 ртези, виготовлені з термопластичних матеріалів, відкривають широкі можливості для індивідуалізації та точного моделювання конструкцій. Така адаптація дозволяє зменшити механічне подразнення шкіри, уникнути пролежнів, покращити стабілізацію опорно-рухового сегмента та підвищити комплаєнтність пацієнтів до носіння пристрою. Це особливо важливо для хворих з неврологічними розладами або осіб похилого віку, для яких важлива мінімізація дискомфорту [5, 19].

Слід також підкреслити роль мультидисциплінарного підходу у процесі вибору матеріалів та виготовлення ортопедичних засобів. Співпраця лікаря, фізичного терапевта, інженера та навіть психолога забезпечує всебічну оцінку потреб пацієнта, дозволяє врахувати вплив психоемоційного стану на ефективність використання пристрою та сприяє формуванню стратегії індивідуальної реабілітації [14,

18, 22]. Таким чином, біомеханіка матеріалів повинна розглядатись не лише як інженерна дисципліна, але і як важлива складова клінічного мислення.

Водночас, слід зазначити наявність певних обмежень у доступності високотехнологічних матеріалів, зокрема в умовах державних медичних закладів або в країнах із обмеженим фінансуванням охорони здоров'я. Це створює потребу в подальших дослідженнях щодо розробки доступних, але ефективних біоматеріалів, які можуть забезпечити належну якість лікування навіть за умов обмежених ресурсів.

Загалом, результати дослідження підтверджують, що глибоке розуміння біомеханіки матеріалів має стати невід'ємною частиною професійної компетентності спеціалістів, які працюють у сфері ортопедії, фізичної реабілітації та протезування.

Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що вивчення біомеханіки матеріалів, які використовуються у протезуванні та ортезуванні кінцівок і хребта, є критично важливим не лише з наукової, але й з практичної точки зору. Сучасна клінічна практика вимагає від фахівців глибокого розуміння того, як фізико-механічні характеристики матеріалів впливають на функціональність, комфорт і довговічність ортопедичних пристроїв. Успішне протезування та ортезування не може ґрунтуватися лише на конструктивних рішеннях — ефективність лікування визначається здатністю матеріалу інтегруватися у біомеханічну систему тіла пацієнта.

Аналіз властивостей матеріалів, таких як титан, вуглецеве волокно, термопластики та поліетилен високої щільності, демонструє їхню різну, але взаємодоповнюючу ефективність у різних клінічних ситуаціях. Вуглецеві композити забезпечують динамічну амортизацію та енергозбереження, титан гарантує міцність і біосумісність, а термопластики — високу адаптивність та комфорт у щоденному використанні. Ці характеристики не є

абстрактними: вони безпосередньо впливають на відновлення функціональної здатності, зменшення больового синдрому, тривалість реабілітації та якість життя пацієнта.

Практична цінність результатів полягає в усвідомленні необхідності мультидисциплінарного підходу: лише через об'єднання зусиль лікарів, фізичних терапевтів, біомеханіків і інженерів-протезистів можливе створення дійсно ефективних та індивідуалізованих ортопедичних рішень. Такий підхід дозволяє врахувати не лише анатомічні особливості, але й специфіку способу життя, рівень активності, психоемоційний стан пацієнта, що, у свою чергу, формує якісно новий стандарт у сфері реабілітаційної медицини.

Отже, біомеханіка матеріалів повинна розглядатися як фундаментальний компонент процесу виготовлення і підбору протезів та ортезів. Її вивчення та впровадження у клінічну практику є не просто бажаним, а необхідним кроком до персоналізованої, науково обґрунтованої та ефективної медичної допомоги.

Література:

1. *Abd-Elaziem W., Ibrahim S. M., Shokry H., Mohamed M.* Titanium-Based Alloys and Composites for Orthopedic Implants Applications: A Comprehensive Review // *Materials & Design*. 2024. Vol. 241. Article ID 112850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112850>
2. *Siddiqui M. I. H., Pulikkalparambil H., Siengchin S.* The Impact of Laminations on the Mechanical Strength of Carbon-Fiber Composites for Prosthetic Foot Fabrication // *Crystals*. 2022. Vol. 12(10). P. 1429. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12101429>
3. *Ceddia M., Trentadue B.* A Review of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite Used to Solve Stress Shielding in Total Hip Replacement // *AIMS Materials Science*. 2024. Vol. 11(2). P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3934/mat.20244001>
4. *Wang S., Chen Z., Yang Y. et al.* The Rational Design, Biofunctionalization and Biological Properties of Orthopedic Porous Titanium Implants // A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025. Vol. 13. Article ID 1548675. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1548675>
5. *Hamzah M., Shah A., Sulaiman S. et al.* Design of a Novel Carbon-Fiber Ankle-Foot Prosthetic Using Finite Element Modeling. *ResearchGate*. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329334580>
6. *Elgamsy R., Hassan M.* Optimization Design of a Carbon Fibre Prosthetic Foot for Amputee. *ResearchGate*. 2023. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346094635>
7. *Siony N., Dhillon A., Razaq M.* Computational Design of Corrosion-Resistant and Wear-Resistant Titanium Alloys for Orthopedic Implants. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2210.00845. URL: <https://arxiv.org/abs/2210.00845>
8. *Bolívar E., Garrido J., Masías M.* Robust Optimal Design of Energy Efficient Series Elastic Actuators: Application to a Powered Prosthetic Ankle. *arXiv preprint*. 2018. arXiv:1812.04771. URL: <https://arxiv.org/abs/1812.04771>
9. *Soares D. R., Silva A. L., Santos R.* Modification of Titanium Orthopedic Implants with Bioactive Glass: A Systematic Review of In Vivo and In Vitro Studies // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. Article ID 1269223. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1269223>
10. *Abar A., Wang S., Zuo J. et al.* The Rational Design, Biofunctionalization and Biological Properties of Orthopedic Porous Titanium Implants // A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025. Vol. 13. Article ID 1548675. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1548675>
11. *Abd-Elaziem W., Ibrahim S. M., Shokry H.* Titanium-Based Alloys and Composites for Orthopedic Implants Applications // A Comprehensive Review.

ResearchGate. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/378943264>

12. Nalezinkova D., Bargavi P. Hemocompatibility Analysis of Bioactive Glass Coatings on Titanium Implants // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. Article ID 1269223. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1269223>

13. Bargavi P., Rajendran N. Hemocompatibility of Bioactive Glass Coatings Doped with Alumina and Zirconia // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. Article ID 1269223. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1269223>

14. Pulikkalparambil H., Siddiqui M. I. H., Siengchin S. Improvement of Mechanical Properties of Carbon-Fiber Composites for Prosthetic Applications // *Crystals*. 2022. Vol. 12(10). P. 1429. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12101429>

15. Chen Z., Li X., Liu Q. Wettability and Surface Energy of Titanium Implants Modified with Bioactive Glass // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Vol. 11. Article ID 1269223. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1269223>

16. Stevens P. M. The Importance of Biomechanics in Prosthetic Design // *Prosthetics and Orthotics International*. 2020. Vol. 44(6). P. 413–418. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309364620969994>

17. *Advances in Prosthetics and Orthotics*. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023. URL: <https://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12891-024-07246-y>

18. *A Review of Technology, Materials, and R&D Challenges of Upper Limb Prosthetics*. PMC. 2021. Article ID PMC7787923. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7787923/>

19. *Review of Prosthetics & Orthotics Needs for the 21st Century*. PMC. 2023. Article ID PMC10443484. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10443484/>

20. *Design, Analysis, and Development of Prosthetic and Orthotic Devices*. ScienceDirect. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840424000854>

21. *Advances in Biomechanics: Shaping the Future of Prosthetics and Improving Quality of Life*. EDI Weekly. 2023. URL: <https://www.ediweekly.com/advances-in-biomechanics-shaping-the-future-of-prosthetics-and-improving-quality-of-life/>

22. *Advances in Prosthetics and Orthotics*. ResearchGate. 2023. URL: <https://www.researchgate.net/publication/378173745>

23. *Practitioner Exam References and Reading List*. American Board for Certification in Orthotics, Prosthetics & Pedorthics. 2025. URL: <https://www.abcop.org/publication/practitioner-exam-references-and-reading-list>

24. *A Systematic Review in Prosthetics and Orthotics Education Research* // *Prosthetics and Orthotics International*. 2020. Vol. 44(1). P. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309364620912642>

25. Negrini S., Aulisa A.G., Cerny P. The classification of scoliosis braces developed by SOSORT with SRS, ISPO, and POSNA and approved by ESPRM // *European Spine Journal*. 2022 V.31. P. 980–989. <https://doi.org/10.1007/s00586-022-07131-z>

26. *Prosthetics and Orthotics Market Size*. Grand View Research. 2024. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/prosthetics-orthotics-market>

21.05.2025

Відомості про авторів:

Літвиненко Микола Ігоревич — кандидат медичних наук, доцент, кафедра гігієни; Харківський національний медичний університет; Харків, Україна; email: mi.lytvynenko@knmu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1308-5034>

Рисована Любов Михайлівна — кандидат технічних наук, доцент, кафедра медичної та біологічної фізики і медичної інформатики; Харківський національний медичний університет; Харків, Україна; email: lm.rysovana@knmu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7937-4176>

Григорук Вікторія Володимирівна — кандидат медичних наук, доцент; кафедра екстреної та невідкладної медичної допомоги, ортопедії, травматології та протезування; Харківський національний медичний університет; Харків, Україна; email: vv.hryhoruk@knmu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8937-7802>

Гранкіна Світлана Семенівна — старший викладач, кафедра медичної та біологічної інформатики; Харківський національний медичний університет; Харків, Україна; email: ss.hrankina@knmu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-5817>

Алексеєнко Роман Васильович — кандидат медичних наук, доцент; кафедра фізіології; Харківський національний медичний університет; Харків, Україна; email: rv.alekseinko@knmu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0926-7903>