

УДК 617.58-77

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ В КОНСТРУКЦІЇ ЗОВНІШНІХ ПРОТЕЗІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК ЛЮДИНИ

Фурса Сергій Ярославович

fyraserg@gmail.com

Тарасова Лариса Дмитрівна

larisa.tarasova.dmitrievna@gmail.com

Кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

м. Київ, Україна

Реферат – Композитні матеріали застосовуються в зовнішніх протезах нижніх кінцівок людини з різних причин. Зокрема досліджуються їхні фізичні та механічні властивості, що дозволяє створювати протези, які мають високу міцність, легкість та зручність в експлуатації. Одним з найбільш поширених композитних матеріалів, який використовується в зовнішніх протезах нижніх кінцівок, є карбонове волокно. Цей матеріал має високу міцність та легкість, що дозволяє створювати протези, які не тільки ефективні у функціональному відношенні, але й комфортні в експлуатації. Крім того, карбонове волокно має високу стійкість до зношування та корозії, що дозволяє збільшити термін експлуатації протеза нижньої кінцівки людини. Ще одним композитним матеріалом, який використовується в зовнішніх протезах нижніх кінцівок людини, є скловолокно, що схоже за властивостями до карбонового волокна, але є дещо менш міцним та жорстким. Також, скловолокно більш тривалий час зношується, ніж карбонове волокно, що робить його перспективним для створення протезів, які мають бути зносостійкими. У даній роботі були проведені фізико-механічні дослідження деталі зовнішнього протезу нижньої кінцівки людини. Дана деталь є аналогом до тих, які використовують наразі. Було продемонстровано відмінності між типами даної деталі, та залежність зміни фізико-механічних властивостей від кута намотки волокна.

Ключові слова: протез, полімер, композит, матриця, волокно

I. ВСТУП

Альтернативний композитний матеріал – це матеріал, який складається з двох або більше компонентів, зазвичай різних за своїм складом і властивостями, які об'єднуються, щоб утворити матеріал з покращеними властивостями порівняно з окремими компонентами. Такі матеріали, як правило, складаються з матриці, яка є основою матеріалу, і волокна, яке покращує механічні властивості матеріалу. Альтернативні композитні матеріали використовуються як заміна традиційним матеріалам, таким як сталь, алюміній або скло.

Дослідження альтернативного композитного матеріалу в конструкції

зовнішніх протезів нижніх кінцівок людини може бути дуже важливим з точки зору поліпшення якості життя людей, які втратили свої кінцівки або частину них. Основна мета дослідження – випробування матеріалу, який має бути міцним, легким і зносостійким, а також відповідати вимогам гігієни та безпеки. Для дослідження можна використовувати різні види композитних матеріалів, які складаються з двох або більше компонентів, наприклад, вуглецевих волокон, арамідних волокон, скловолокон та епоксидної смоли. В процесі дослідження необхідно випробувати різні варіанти складу та конструкції композитних матеріалів, визначити їх механічні властивості, зносостійкість та стійкість до впливу різних

факторів, таких як вологість, температура та хімічні речовини. Для тестування композитних матеріалів можна використовувати різні методи, такі як механічні випробування, випробування на зносостійкість та термічну стійкість, а також випробування на корозію та стійкість до різних хімічних речовин. Після дослідження і випробування матеріалу можна зробити висновки про його властивості та ефективність в конструкції зовнішніх протезів нижніх кінцівок людини. У разі успішного дослідження можна розробити протези з використанням альтернативного композитного матеріалу, що забезпечить їм більшу міцність та зносостійкість [1].

Механічне дослідження композитних матеріалів – це один з ключових етапів дослідження альтернативних композитних матеріалів в конструкції зовнішніх протезів. На початковому етапі дослідження, проводяться випробування на розтяг та згин композитних зразків для визначення механічних властивостей матеріалу, таких як міцність, жорсткість, зносостійкість та інші. Під час випробувань важливо враховувати фізичні та хімічні властивості композитного матеріалу, а також взаємодію компонентів матеріалу. Далі, випробування проводять на зразках, які симулюють структуру конструкції зовнішнього протеза нижньої кінцівки людини. Заздалегідь створюються зразки з формою, що наближається до форми конструкції протезу. Потім проводяться випробування на згин, розтяг, стиск та інші види механічного навантаження для визначення ефективності та зносостійкості композитного матеріалу в конструкції протезу нижньої кінцівки людини. Для підвищення точності випробувань і отримання більш детальних результатів можна використовувати різні методи дослідження, такі як мікроскопія, комп'ютерна томографія, інфрачервона спектроскопія тощо. Отримані результати досліджень механічних властивостей композитного матеріалу в конструкції зовнішніх протезів нижніх кінцівок людини можуть бути використані для вдосконалення та оптимізації дизайну протезів,

забезпечення безпеки та комфорту для користувачів протезів, а також для підвищення ефективності лікування та реабілітації людей.

II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є дослідження впливу орієнтації волокон на механічні характеристики альтернативної композитної деталі зовнішнього протезу нижньої кінцівки людини для покращення фізичних, фізико-механічних, фізико-хімічних властивостей існуючих деталей. Дана деталь може використовуватись для заміни гомілкової частини протезу нижньої кінцівки людини.

Альтернативний композитний матеріал має вищу міцність та стійкість до зношування, що забезпечує довговічність протезів [2].

Важливо також враховувати екологічний аспект, оскільки композитні матеріали можуть бути більш стійкими до корозії та біологічного розкладу, що зменшує вплив на довкілля. Саме тому розробка даної деталі важлива не тільки для медицини, а й для екології.

III. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В ході досліджень використовувалися два методи механічних випробувань, а саме: міцність деталі (рис. 1) на згин та міцність на стиснення.



Рисунок 1 – Досліджувані деталі

При дослідженні міцності на згин слід розглянути методику цього дослідження. Згин – це навантаження, при якому в поперечних перерізах деталі виникають згинаючі моменти. Також під час цього дослідження виникають поперечні зусилля,

які також потрібно врахувати. Але якщо поперечні зусилля не виникають, то цей тип деформації називається чистим згином. Поперечний згин, це деформація, при якій виникають як згинаючі моменти, так і поперечні. Для проведення дослідження трубки на згин необхідно використовувати спеціальні тестові прилади, які здійснюють навантаження на трубку в напрямку, перпендикулярному до її осі. Такі прилади зазвичай мають дві точки опори, між якими розташована трубка. Під час тестування фіксуються значення відгину трубки, з яких можна визначити параметри міцності, такі як напруження згину, момент інерції, згинальна міцність і т. д.

Для отримання надійних результатів дослідження необхідно дотримуватись встановлених норм і стандартів, враховувати властивості матеріалу, товщину та діаметр трубки, а також уникати впливу зовнішніх факторів, таких як вологість, температура, швидкість навантаження. Важливо також забезпечити належну фіксацію трубки та точок опори, щоб уникнути спотворення результатів тестування [3].

Дослідження трубки на стиснення – це процес вивчення поведінки трубки при дії зовнішнього тиску, який може призвести до складних механічних деформацій і навіть руйнування трубки. Дослідження трубки на стиснення можна проводити різними способами, включаючи експериментальні і чисельні методи. До експериментальних методів належать тестування на стиснення з використанням спеціальних приладів, таких як механічні тиски, гідравлічні преси або випробувальні машини.

Для визначення фізико-механічних характеристик, таких як міцність та модуль пружності при розтягуванні, стисканні і згинанні використовується універсальна розривна машина Tiratest 2300 (рис. 2), що забезпечує навантаження зразка до 10 т з постійною заданою швидкістю й вимір навантаження з погрешністю не більше 1 % від вимірюваної величини. Виміри проводяться по датчику силовимірювача модернізованої випробної машини Tiratest-

2300. Для виміру геометричних параметрів зразків використовувалися мікрометр і штангенциркуль [4-6].

До чисельних методів дослідження трубки на стиснення належать метод скінченних елементів, метод скінченних різниць і метод елементів скінченних об'ємів. Ці методи дозволяють розрахувати деформації трубки та інші параметри з високою точністю, що дозволяє знизити ризик руйнування трубки при експлуатації. В дослідженнях трубок на стиснення важливо враховувати такі параметри, як матеріал трубки, довжину трубки, зовнішній тиск, товщину стінки трубки, діаметр трубки та інші [7-10].

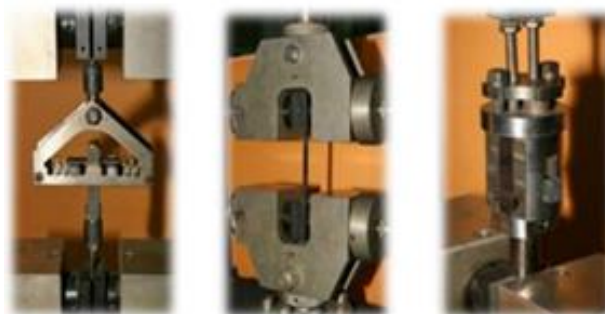


Рисунок 2 – Універсальна розривна машина Tiratest 2300 і випробувальне оснащення [6]

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дана деталь має форму трубки, що дає можливість замінити вже існуючу деталь гомілки в зовнішньому протезі нижньої кінцівки людини. Виготовлення даної деталі

відбувається шляхом намотки вуглецевого волокна на трубку необхідного зовнішнього діаметра. Вуглецева нитка є суцільною та неперервною під час процесу намотки. Перед процесом намотки слід визначитись з довжиною самої деталі та її зовнішнім і внутрішнім діаметрами, а також з кутом намотки. Різниця між зовнішнім та внутрішнім діаметрами деталі, буде товщиною стінки трубки. Дана різниця буде сформована шарами намотки. Цей параметр потрібно обрати заздалегідь, тому що від нього також буде залежати фізико-механічні властивості деталі. Наступним етапом є вибір спеціального компаунду, тобто матриці. Саме цей вибір буде значною мірою впливати на фізико-механічні результати випробувань.

Було використано такий склад матриці: епоксидна смола (Ероху-520), пластифікатор (ДБФ), отверджувач (Poly-7) в пропорції 10/1/1 відповідно. Даний компаунд був витриманий в вакуумній камері для видалення атмосферного повітря.

Після того, як всі параметри деталі обрано та підготовано поверхню для намотки, а також матрицю, слід розпочати процес виготовлення деталі.

Спеціальний станок для намотки контролює весь процес сам, тому людський фактор в побудові структури трубки виключається (рис. 3).

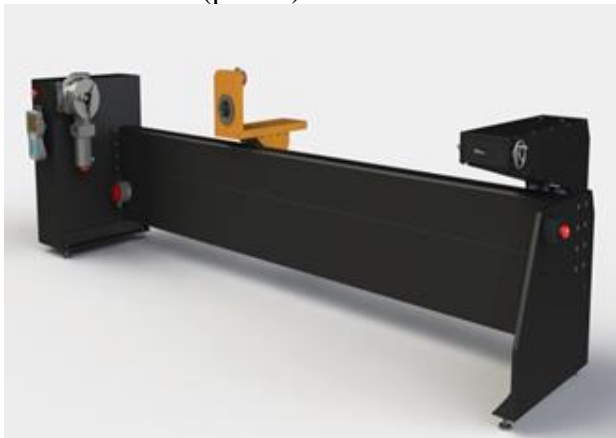


Рисунок 3 – Спеціальний станок для намотки [11]

Для створення зразків необхідної композитної деталі для протезування нижніх кінцівок людини використовувався верстат типу «SM Filament Winder». Даний верстат

ідеально підходить для виробництва деталей середнього розміру. Завдяки наявності одного шпинделю та до п'яти осей, цей верстат ідеально підходить для виготовлення невеликих обсягів деталей. Виробництво композитних деталей спрощено завдяки простому у використанні інтерфейсу та програмному забезпеченню для намотування. Даний верстат має контролер типу «FANUC», а також обладнаний волоконною системою для вологої намотки. Головними елементами специфікації даного верстату є:

- швидкість шпинделю – 150 об/хв;
- швидкість горизонтального переміщення – 153 см/с;
- швидкість обертання – 102 см/с;
- діаметр обертання – 10 см;
- швидкість обертання – $1,5\pi$ рад/с [11].

Після закінчення вологої намотки трубки поміщають до сушильної шафи та проводять сушку при температурі 60°C протягом двох годин.

Для проведення механічних випробувань було виготовлено 6 деталей, які відрізнялися лише кутом намотки волокна.

Основні характеристики деталей:

- довжина – 150 мм;
- внутрішній діаметр – 32 мм;
- товщина стінки 4 мм;
- співвідношення волокно-матриця 1:1.

Результати випробувань деталей на згин та стиснення наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1 – Результати випробувань деталей на міцність на згин

Кут намотки – 30°	
Щільність	1,44 г/см ²
Міцність на згин:	
• мінімальна	441,09 МПа
• середня	588,25 МПа
• максимальна	771,94 МПа
Кут намотки – 45°	
Щільність	1,46 г/см ²
Міцність на згин:	
• мінімальна	738,14 МПа
• середня	823,03 МПа
• максимальна	941,85 МПа
Кут намотки – 67°	
Щільність	1,45 г/см ²
Міцність на згин:	
• мінімальна	387,01 МПа
• середня	417,04 МПа
• максимальна	459,03 МПа

Таблиця 2 – Результати випробувань деталей на міцність на стиснення

Кут намотки – 30°	
Щільність	1,44 г/см ²
Міцність на стиснення:	
• мінімальна	110,76 МПа
• середня	125,32 МПа
• максимальна	136,37 МПа
Кут намотки – 45°	
Щільність	1,46 г/см ²
Міцність на стиснення:	
• мінімальна	99,45 МПа
• середня	115,44 МПа
• максимальна	130,65 МПа
Кут намотки – 67°	
Щільність	1,45 г/см ²
Міцність на стиснення:	
• мінімальна	146,25 МПа
• середня	163,28 МПа
• максимальна	181,74 МПа

Отже, виходячи з даних результатів дослідження прослідковується певна залежність фізико-механічних властивостей деталі від кута намотки. Згідно цих даних, під час підбору даної деталі, конструктор зовнішнього протезу має оцінити які

параметри йому важливіші, та обрати потрібний йому зразок.

Також слід додати, що дана деталь є безпечною для людини, адже в ролі матриці виступають речовини, які після процесу утворення не є леткими, та не можуть нанести прямої шкоди здоров'ю людини.

V. ВИСНОВКИ

1. Під час досліджень альтернативного композитного матеріалу для зовнішніх протезів людини було розглянуто методику фізико-механічного дослідження трубчастих деталей, підібрано відповідне обладнання, проведені фізико-механічні випробування деталей з різним кутом намотування волокна.

2. Альтернативні композитні матеріали в зовнішніх протезах людини є перспективним напрямком в розвитку сучасної медицини. Для пацієнтів з ампутацією кінцівок, використання композитних матеріалів може забезпечити не тільки естетичну, але і функціональну заміну втраченої кінцівки.

3. Застосування композитних матеріалів має кілька переваг порівняно з традиційними матеріалами, такими як метал та пластик. Композитні матеріали мають високу міцність та мінімальну вагу, що робить їх ідеальним вибором для зовнішніх протезів. Вони також можуть бути легко формовані та адаптовані до потреб користувача.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Пацієнти участі в дослідженні не приймали.

ORCID ID та внесок авторів

0009-0002-0614-3988 (A, B, C, D, F) Fyrsa Serhii

0000-0002-3997-1635 (D, E, F) Larisa Tarasova

A - Концепція роботи та дизайн, B - аналіз даних, C - Відповідальність за статистичний аналіз, D - Написання статті, E - Критичний огляд, F - Остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Haider, W., & Ansari, U. (2019). Biomedical Applications of Polymeric Materials and Composites: A Review. *Polymers*, 11(12), 2022.
- Ngo, T. D., Kashaninejad, N., Imbalzano, G., & Nguyen, N. T. (2018). Polymeric hydrogels for burn wound dressings: a review. *Bioengineering*, 5(3), 56.
- "Fabrication and characterization of polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite materials for prosthetic applications" - S. Kim, Y. H. Kim, H. S. Yang, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2019.
- "Development and characterization of a new type of polymer composite material for prosthetic sockets" - H. Park, J. H. Kim, S. W. Lee, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2019.
- "Mechanical and thermal properties of carbon fiber reinforced polymer composites" - S. Vijay, V. Prakash, A. Gupta, *Journal of Composite Materials*, 2018.
- Технічна специфікація станка «Teratest 2300» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://all-pribors.ru/docs/60341-15.pdf>
- J.-F. Zhang, W.-S. Li, Y. Zhang, H. Yuan, Y.-L. Wang, J. Li, and G.-P. Li, "Composite materials for prosthetic limbs: A review," *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 15-27, 2017.
- K. Banerjee, "Design and development of lower limb prostheses using composite materials," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 15, no. 5, pp. 1-25, 2015.
- J. M. Schaeffer, L. T. Sanders, R. W. Keith, and S. S. Rao, "Development of a lightweight composite prosthetic foot," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 106, no. 6, pp. 2171-2177, 2018.
- T. P. Do, L. J. Meng, Y. J. Lin, and H. C. Yen, "Design and analysis of a composite below-knee prosthesis," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 18, no. 2, pp. 1-14, 2018.
- Технічна специфікація станка «SM Filament Winder» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://etcwinders.com/standard-filament-winders/sm-filament-winder/>

UDC 617.58-77

RESEARCH OF ALTERNATIVE COMPOSITE MATERIAL IN THE DESIGN OF EXTERNAL PROSTHESES OF HUMAN LOWER LIMBS

Serhii Fyrsa

fyrsaserg@gmail.com

Larisa Tarasova

larisa.tarasova.dmitrievna@gmail.com

Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

***Abstract** – Composite materials are used in external prostheses of the lower human limbs for various reasons. In particular, their physical and mechanical properties are studied, which allows to create prostheses that have high strength, lightness and ease of use. One of the most common composite materials used in external prostheses of the lower limbs is carbon fiber. This material has high strength and lightness, which allows you to create prostheses that are not only functionally effective, but also comfortable to use. In addition, carbon fiber has a high resistance to wear and corrosion, which allows to increase the service life of the human lower limb prosthesis. Another composite material used in external human lower limb prostheses is fiberglass, which has similar properties to carbon fiber, but is somewhat less strong and rigid. Also, glass fiber wears out for a longer time than carbon fiber, which makes it promising for the creation of prostheses that must be wear-resistant. In this work, physical and mechanical studies of the details of the external prosthesis of the lower human limb were carried out. This detail is analogous to those currently in use. The differences between the types of this part and the dependence of changes in physical and mechanical properties on the fiber winding angle were demonstrated.*

Key words: prosthesis, polymer, composite, matrix, fiber