

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний
(факультет)

Кафедра механічної та біомедичної інженерії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра
(бакалавра, магістра)

студента Гудима Владислава Вадимовича
(ПІБ)

академічної групи 132-20ск-4 ММФ
(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і назва спеціальності)

за **освітньо-професійною програмою** «Біотехнічне та медичне матеріалознавство»
(офіційна назва)

на тему Аналіз міцності елементів протезів нижніх кінцівок
(назва за наказом ректора)

Керівник (керівники)	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Онищенко С.В.			
розділів				
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Онищенко С.В.			
Функціональний аналіз матеріалів та виробів	Онищенко С.В.			
Розробка тривимірної моделі протеза стопи	Онищенко С.В.			
Дослідження і аналіз міцності та жорсткості тривимірної моделі протеза стопи	Колосов Д.Л.			

Рецензент	Ротт Н.О.			
Нормоконтролер	Науменко О.Г.			

Дніпро 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО:завідувач кафедри механічної та біомедичної інженерії
(повна назва)Колосов Д.Л.

(підпис) (прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ**на кваліфікаційну роботу ступеня бакалавра**
(бакалавра, магістра)студенту Гудиму Владиславу Вадимовичу

(прізвище та ініціали)

академічної групи 132-20ск-4 ММФ

(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

спеціалізації

за освітньо-професійною програмою «Біотехнічне та медичне матеріалознавство»на тему Аналіз міцності елементів протезів нижніх кінцівокзатверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 01.05.2023 р. № 310-с.

Етап	Зміст	Термін виконання
1	Аналіз стану питання та постановка задач роботи	19.05.2023
2	Функціональний аналіз матеріалів та виробів	02.06.2023
3	Розробка тривимірної моделі протеза стопи	09.06.2023
4	Дослідження і аналіз міцності та жорсткості тривимірної моделі протеза стопи	19.06.2023

Завдання видано

(підпис керівника)

Онищенко С.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі 08.05.2023 р.Дата подання до екзаменаційної комісії 20.06.2023 р.**Прийнято до виконання**

(підпис студента)

Гудим В.В.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 46 рис., 6 табл., 1 додаток, 61 джерело. ЕЛЕМЕНТ КОНСТРУКЦІЇ, ЖОРСТКІСТЬ, КОЛІННИЙ МОДУЛЬ, МІЦНІСТЬ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, НИЖНЯ КІНЦІВКА, ПІЛОН, ПРИЙМАЛЬНА ГІЛЬЗА, ПРОТЕЗ СТОПИ, ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт розроблення – елемент протеза нижньої кінцівки людини.

Мета роботи – проаналізувати напружено-деформований стан та параметри міцності та жорсткості моделі протеза стопи нижньої кінцівки людини, виготовленої з різних матеріалів.

Результати та їх новизна – досліджено напружено-деформований стан моделі та встановлено характери залежностей параметрів міцності та жорсткості від експлуатаційних параметрів стопи Restore, виготовленої з різних матеріалів. Новизна технічного рішення полягає в розробці методичних рекомендацій щодо вибору матеріалу стоп протезів з низьким функціональним рівнем на основі дослідження його параметрів міцності та жорсткості під дією експлуатаційних навантажень.

Взаємозв'язок з іншими роботами – продовження інноваційної діяльності кафедри механічної та біомедичної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в удосконаленні методів моделювання та візуалізації елементів біотехнічних виробів, а також аналізу їхніх параметрів та розробці рекомендацій щодо дослідження властивостей матеріалів виробів біотехнічного та медичного призначення.

З урахуванням дослідницького рівня роботи розроблено технічний висновок, що конструкція стопи Restore із вуглецевої сталі має кращі показники міцності та жорсткості у порівнянні з моделями із неіржавної сталі чи титана.

Сфера застосування розробки – дослідження, розробка та виробництво елементів протеза нижньої кінцівки.

Практична значимість кваліфікаційної роботи – результати роботи можуть застосовуватись при розробці та виробництві елементів протеза нижньої кінцівки та у освітньому процесі за освітньо-професійною програмою «Біотехнічне та медичне матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ	8
1.1 Історична довідка з протезування нижніх кінцівок	8
1.2 Причини та статистика ампутації та реабілітації	16
1.3 Цикл ходьби в нормі та після протезування	20
1.4 Особливості протезування і реабілітації та сучасний стан досліджень	22
1.5 Мета та постановка задач роботи	25
1.6 Висновки за розділом 1	26
2 ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ	28
2.1 Функціональний рівень пацієнта після ампутації (К-рівень)	28
2.2 Вартість та матеріали елементів протезів нижніх кінцівок	29
2.3 Класифікація протезів нижніх кінцівок	34
2.4 Функціональні особливості елементів протеза нижньої кінцівки	38
2.5 Аналіз конструкцій протезів стоп	40
2.6 Висновки за розділом 2	46
3 РОЗРОБКА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ПРОТЕЗА СТОПИ	49
3.1 Побудова тривимірної моделі протеза стопи	49
3.2 Побудова сітки скінчених елементів	54
3.3 Граничні умови для дослідження моделі стопи протеза	55
3.4 Висновки за розділом 3	56
4 ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ПРОТЕЗА СТОПИ	57
4.1 Дослідження тривимірної моделі протеза стопи із вуглецевої сталі	57
4.2 Дослідження тривимірної моделі протеза стопи із неіржавної сталі	60
4.3 Дослідження тривимірної моделі протеза стопи із титана	62
4.4 Аналіз міцності та жорсткості тривимірної моделі стопи	64

4.5 Висновки за розділом 4	67
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А Відгук керівника кваліфікаційної роботи	76

ВИСНОВКИ

У першому розділі було розглянуто історію розвитку протезування, причини і статистику ампутації нижніх кінцівок, наведено та роз'яснено поняття циклу ходьби, описані основні виклики в протезуванні та сучасний стан досліджень у біотехнічному та медичному матеріалознавстві та в суміжних з протезуванням галузях.

У другому розділі було розглянуто поняття функціонального рівня пацієнта після ампутації та його категорії, розглянуто вартість протезів нижніх кінцівок, властивості та особливості використання та вибору матеріалів елементів протеза, наведено класифікацію протезів нижніх кінцівок, виконано функціональний аналіз елементів протеза нижньої кінцівки, зокрема найбільш поширених у використанні стоп для низького функціонального рівня пацієнтів від лідерів світового ринку Ottobock, Ossur та Blatchford.

У третьому розділі розроблено тривимірну розрахункову параметричну модель стопи Restore від OTTOBOCK, побудовано сітку скінчених елементів інструментом «сітка» в пакеті «аналіз напружень» Autodesk Inventor, задано граничні умови для моделі та діапазон зміни експлуатаційних навантажень моделі, а також перелік матеріалів моделі для дослідження.

У четвертому розділі проведено моделювання навантаження стопи Restore від OTTOBOCK в пакеті «аналіз напружень» Autodesk Inventor. Досліджено напружено-деформований стан моделі та встановлено характерні залежностей параметрів міцності та жорсткості від експлуатаційних параметрів стопи Restore, виготовленої з різних матеріалів.

Результати кваліфікаційної роботи бакалавра можуть застосовуватись при розробці та виробництві елементів протеза нижньої кінцівки та у освітньому процесі за освітньо-професійною програмою «Біотехнічне та медичне матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Amsan A. N., Nasution A. K., Ramlee M. H. A Short Review on the Cost, Design, Materials and Challenges of the Prosthetics Leg Development and Usage. *Advances in Engineering Research*, Vol. 190. International Conference of CELSciTech 2019 - Science and Technology track. - Atlantis Press. : 2019. – P. 59-64. [Короткий огляд вартості, дизайну, матеріалів та викликів у розробці і експлуатації протезів ніг].
2. Vimal, A.K., et al., Search algorithm for optimal damping parameters of transfemoral prosthetic limb. *Applied Mathematical Modelling*, 2019. **72**: p. 356-368. [Алгоритм пошуку оптимальних параметрів демпферування у трансфеморальних протезах кінцівок].
3. Muñoz-Vásquez S., Mora-Pérez Z. A., Ospina-Henao P.A., Valencia-Niño C.H., Becker M. and Díaz-Rodríguez J.G. Finite element analysis in the balancing phase for an open source transfemoral prosthesis with magneto-rheological damper. *Inventions*. 2023, 8, 36. <https://doi.org/10.3390/inventions8010036>. [Скінчено-елементний аналіз протеза нижньої кінцівки із магнітно-реологічним демпфером у балансувальній фазі руху].
4. Figueroa R., Müller-Karger C.M. Using FE for Dynamic Energy Return Analysis of Prosthetic Feet during Design Process. 25th Southern Biomedical Engineering Conference 2009, IFMBE Proceedings 24, pp. 289–292.
5. Arifin, N., et al., Provision of Prosthetic Services Following Lower Limb Amputation in Malaysia. *Malaysian Journal of Medical Sciences*, 2017. 24(5): p. 106-111.
6. Aravinthan, P., et al. Design, development and implementation of neurologically controlled prosthetic limb capable of performing rotational movement. in INTERACT-2010. 2010. IEEE.
7. Thurston, A.J., Paré and prosthetics: the early history of artificial limbs. *ANZ journal of surgery*, 2007. 77(12): p. 1114-1119.

8. Finch, J., The ancient origins of prosthetic medicine. *The Lancet*, 2011. 377(9765): p. 548-549.
9. Bhuyan, D. & Kumar, K. (2019). A Brief History of Prosthetics and Orthotics of the Lower Body and Their Types. In K. Kumar & J. Davim (Eds.), *Design, Development, and Optimization of Bio-Mechatronic Engineering Products* (pp. 36-56). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8235-9.ch002>
10. Marshall, J. (2015). *The History of Prosthetics*. Retrieved 16 April 2016 from <http://unyq.com/the-history-of-prosthetics/>
11. Clements, I. P. (2008). How Prosthetic Limbs Work. Retrieved 16 April 2016 from <http://science.howstuffworks.com/prosthetic-limb.htm>
12. Norton, K. M. (2007). A Brief History of Prosthetics. *inMotion*, 17(7), 11-13.
13. Масна 3.3. Ампутація // Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua/Ампутація> (дата звернення: 15.05.2023).
14. McDonald, Cody L.; Westcott-McCoy, Sarah; Weaver, Marcia R; Haagsma, Juanita; Kartin, Deborah Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthetics and Orthotics International*: April 2021 – Volume 45 – Issue 2 – p. 105-114. DOI: [10.1177/0309364620972258](https://doi.org/10.1177/0309364620972258).
15. Rachel Nall, MSN, CRNA. Amputation: Causes, Statistics, and Your Most-Asked Questions. Інтернет-платформа Healthline. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.healthline.com/health/amputation#types> (дата звернення: 15.05.2023).
16. Alberto Esquenazi, MD, Michael Kwasniewski, MD. Lower Limb Amputations: Epidemiology and Assessment. Інтернет-платформа PM&R Knowledge NOW®. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://now.aapmr.org/lower-limb-amputations-epidemiology-and-assessment/> (дата звернення: 15.05.2023).
17. Machinery involved in 58 percent of work-related amputations in 2018. Інтернет-ресурс Бюро статистики праці США. [Електронний ресурс]. – Режим

доступу : <https://www.bls.gov/opub/ted/2020/machinery-involved-in-58-percent-of-work-related-amputations-in-2018.htm> (дата звернення: 15.05.2023).

18. [Дар'я Кєпова](#). Скільки коштуватиме проєкт першого центру реабілітації в Україні та звідки візьмуть кошти, розповів Віктор Ляшко. Офіційний сайт Інформаційно-аналітичного загальнонаціонального медіа ZN.UA ("Дзеркало тижня. Україна"). [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zn.ua/ukr/UKRAINE/skilki-koshtuvatime-projekt-pershoho-tsentru-reabilitatsiji-v-ukrajini-ta-zvidki-vizmut-koshti-rozpoviv-viktor-ljashko.html> (дата звернення: 15.05.2023).

19. Євгенія Ковалевська. Сталеві кінцівки: як військовим повертають ноги і руки, втрачені на війні з Росією. Офіційний сайт BBC News Україна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63004666> (дата звернення: 15.05.2023).

20. Цема В.Є. Клініко-статистичне дослідження рівня ампутації кінцівки у поранених / В.Є. Цема, І.П. Хоменко, А.А. Беспаленко, О.А. Бур'янов, В.Г. Мішалов, А.Ю. Кіх // Клінічна хірургія. №10. Жовтень 2017. – С. 51-54. DOI: 10.26779/2522-1396.2017.10.51

21. Fish DJ and Nielsen CP. [Clinical Assessment of Human Gait](#). Journal of prosthetics and Orthotics 1993. 2(39).

22. Perry J. and Burnfield J.M. Gait Analysis, Normal and Pathological Function. 2nd Ed. USA, SLACK Incorporated USA 2010

23. Masood H, Farooq H. [Utilizing spatio temporal gait pattern and quadratic SVM for gait recognition](#). Electronics. 2022; 11(15):2386.

24. Cicirelli G, Impedovo D, Dentamaro V, Marani R, Pirlo G, D'Orazio TR. [Human gait analysis in neurodegenerative diseases: a review](#). IEEE J Biomed Health Inform. 2022 Jan;26(1):229-42.

25. Gait in prosthetic rehabilitation. Інтернет-енциклопедія Physiopedia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.physio-pedia.com/Gait_in_prosthetic_rehabilitation#cite_note-Fish-1 (дата звернення: 15.05.2023).

26. Di Gregorio R, Vocenas L. [Identification of gait-cycle phases for prosthesis control](#). *Biomimetics* (Basel). 2021 Mar 26;6(2):22.
27. Kishner's Gait Analysis after Amputation updated July 2013. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://emedicine.medscape.com/article/1237638-overview> (дата звернения: 15.05.2023).
28. Gutfleisch, O., Peg legs and bionic limbs: the development of lower extremity prosthetics. *Interdisciplinary Science Reviews*, 2003. 28(2): p. 139-148.
29. Cifu, D.X. and H.L. Lew, *Braddom's Rehabilitation Care: A Clinical Handbook E-Book*. 2017: Elsevier Health Sciences.
30. Esposito, E.R., C.A. Rabago, and J. Wilken, The influence of traumatic transfemoral amputation on metabolic cost across walking speeds. *Prosthetics and Orthotics International*, 2018. 42(2): p. 214-222.
31. Highsmith, M.J., et al., Low back pain in persons with lower extremity amputation: a systematic review of the literature. *The Spine Journal*, 2018.
32. Farrokhi, S., et al., Biopsychosocial risk factors associated with chronic low back pain after lower limb amputation. *Medical hypotheses*, 2017. 108: p. 1-9.
33. Kulkarni, P.G., Paudel, N., Magar, S. *et al.* Overcoming Challenges and Innovations in Orthopedic Prosthesis Design: An Interdisciplinary Perspective. *Biomedical Materials & Devices* (2023). <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00087-8>
34. Nolan, L. and A. Lees, The functional demands on the intact limb during walking for active trans femoral and trans tibial amputees. *Prosthetics and orthotics international*, 2000. 24(2): p. 117-125.
35. Mattes, S.J., P.E. Martin, and T.D. Royer, Walking symmetry and energy cost in persons with unilateral transtibial amputations: matching prosthetic and intact limb inertial properties. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 2000. 81(5): p. 561-568.

36. Verstraten, T., et al., Optimizing the power and energy consumption of powered prosthetic ankles with series and parallel elasticity. *Mechanism and Machine Theory*, 2017. 116: p. 419-432.
37. Au, S.K., J. Weber, and H. Herr, Powered ankle--foot prosthesis improves walking metabolic economy. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009. 25(1): p. 51-66.
38. Awad, M., et al., Towards a smart semi-active prosthetic leg: preliminary assessment and testing. *IFAC-PapersOnLine*, 2016. 49(21): p. 170-176.
39. M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review, *Progress in Materials Science*, Volume 54, Issue 3, 2009, Pages 397-425, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>.
40. Quintero-Quiroz, Catalina & Pérez, Vera. (2019). Materials for lower limb prosthetic and orthotic interfaces and sockets: Evolution and associated skin problems. *Revista de la Facultad de Medicina*. 67. 117-125. 10.15446/revfacmed.v67n1.64470.
41. Jawad K Oleiwi and Ahmed Namah Hadi. Properties of Materials and Models of Prosthetic Feet: a Review. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1094 012151. DOI 10.1088/1757-899X/1094/1/012151
42. Balk EM, Gazula A, Markozannes G, Kimmel HJ, Saldanha IJ, Resnik LJ, Trikalinos TA. Lower Limb Prostheses: Measurement Instruments, Comparison of Component Effects by Subgroups, and Long-Term Outcomes [Internet]. Agency for Healthcare Research and Quality (US); Rockville (MD): Sep, 2018.
43. Kistenberg, R.S., Prosthetic choices for people with leg and arm amputations. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 2014. 25(1): p. 93-115.
44. Brodtkorb, T.-H., et al., Cost-effectiveness of C-leg compared with non-microprocessor-controlled knees: a modeling approach. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 2008. 89(1): p. 24-30.

45. Gerzeli, S., A. Torbica, and G. Fattore, Cost utility analysis of knee prosthesis with complete microprocessor control (C-leg) compared with mechanical technology in trans-femoral amputees. *The European Journal of Health Economics*, 2009. 10(1): p. 47-55.

46. Frossard, L., et al., Cost comparison of socket-suspended and bone-anchored transfemoral prostheses. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2017. 29(4): p. 150-160.

47. Hanson, B., Present and future uses of titanium in engineering. *Materials & Design*, 1986. 7(6): p. 301-307.

48. Smith, M.J., et al., Material characterization and preservation guidance for a collection of prosthetic limbs developed since 1960. *Studies in conservation*, 2014. 59(4): p. 256-267.

49. Schreiber, N. and R. Gettens. Aquatic design for individuals with disabilities: Upper limb prosthesis. in 2014 40th Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBEC). 2014. IEEE.

50. Junqueira, D.M., et al., Design Optimization and Development of Tubular Isogrid Composites Tubes for Lower Limb Prosthesis. *Applied Composite Materials*, 2019. 26(1): p. 273-297.

51. Berry, D.A., COMPOSITE-MATERIALS FOR ORTHOTICS AND PROSTHETICS. *Orthotics and Prosthetics*, 1987. 40(4): p. 35-43.

52. Sanders, J.E., et al., Material properties of commonly-used interface materials and their static coefficients of friction with skin and socks. *Journal of rehabilitation research and development*, 1998. 35: p. 161-176.

53. Kevin P. Smidt, Ryan Bicknell. *Prosthetics in Orthopedics*. Інтернет-ресурс Національної Наукової Бібліотеки США Національного центру біотехнологічної інформації. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570628/> (дата звернення: 15.05.2023).

54. Каталог протезів стоп. Компанія ОТТОВОСК. – Режим доступу : <https://www.ottobock.com/en-gb/category/32333?f> (дата звернення: 15.05.2023).

55. Збалансовані рішення. Компанія Ossur. – Режим доступу : <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics> (дата звернення: 15.05.2023).
56. Протези стоп. Компанія Blatchford. – Режим доступу : <https://www.blatchfordmobility.com/en-gb/products/feet-ankles> (дата звернення: 15.05.2023).
57. Crimin A, McGarry A, Harris EJ, et al. The effect that energy storage and return feet have on the propulsion of the body: A pilot study. *Proc Inst Mech Eng [H]* 2014; 228: 908–915.
58. Strike SC, Arcone D, Orendurff M. Running at submaximal speeds, the role of the intact and prosthetic limbs for trans-tibial amputees. *Gait Posture* 2018; 62: 327–332.
59. Haber CK, Ritchie LJ, Strike SC. Dynamic elastic response prostheses alter approach angles and ground reaction forces but not leg stiffness during a start-stop task. *Hum Mov Sci* 2018; 58: 337–346.
60. Rock CG, Wurdeman SR, Stergiou N, Takahashi KZ. Stride-to-stride fluctuations in transtibial amputees are not affected by changes in push-off mechanics from using different prostheses. *PloS one*. 2018;13(10).
61. WHO standards for prosthetics and orthotics. Geneva: World Health Organization; 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.