

УДК 615.477.23

ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОТЕЗІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК: ВИКЛИКИ, АНАЛІЗ ТА МОЖЛИВІ РІШЕННЯ

Семінська Наталія Валеріївна
seminska@ukr.net

Мусієнко Ольга Станіславівна
olga.musinko@gmail.com

Слободянюк Іванна Валентинівна
slobodianiuk.ivanna@lil.kpi.ua

Белевець Ксенія Сергіївна
k.belevec02@gmail.com

Степанова Анна Андріївна
annastrekoza03@gmail.com

Шитікова Наталія Сергіївна
natalia.02.shytikova@gmail.com

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Анотація – Наразі наша країна стикається з багатьма викликами, на які ми спрямовуємо максимальні зусилля та увагу для їх вирішення. Серед головних завдань - відновлення людських ресурсів, економічна реабілітація після конфлікту, соціальна реінтеграція постраждалих від військових дій та забезпечення повноцінного життя. У прифронтових зонах, особливо там, де проходять активні бойові дії, багато людей стикаються з ризиком серйозних травм. Наслідком цього може бути повна або часткова втрата кінцівок. Це ставить перед медичною та науковою спільнотою складні завдання щодо забезпечення необхідної підтримки і реабілітації постраждалих. Тож у даній статті увага зосереджується на важливості виробництва куксоприймачів, які є ключовими компонентами в конструкції протезів нижніх кінцівок. Основна увага приділяється необхідності персоналізації та точності у їх виробництві, особливо в контексті зростаючої кількості ампутацій, що вимагає ревізії та оптимізації застарілих технологічних процесів. Авторами було переглянуто існуючі підходи та інноваційні методи, зокрема адитивні технології, які можуть сприяти ефективнішому виробництву та покращенню якості протезних виробів. Також у статті обговорюються різні матеріали для гільз, методи фіксації та вплив цих аспектів на комфорт та функціональність протезів. Дослідження і рекомендації, представлені в статті, мають на меті сприяти подальшому розвитку галузі протезування в Україні, покращенню якості життя постраждалих та їхній соціальній адаптації та реінтеграції. Важливою частиною аналізу є розгляд основних параметрів, які впливають на ефективність і прийнятність протезів. Запропоновано інженерні підходи, спрямовані на розв'язання цих критичних проблем.

Ключові слова – кукса після ампутації, протези, куксоприймач, нога, дизайн протеза, силікони, гніздо, адитивне виробництво.

I. ВСТУП

Подолання наслідків військової агресії росії проти України є головним викликом на шляху відновлення нашої країни. На сьогодні однією з масштабних проблем є допомога воїнам, які зазнали ампутацію кінцівок. Кількість таких осіб з кожним днем зростає і на кінець 2024 року по різних оцінках може досягнути 70 тисяч [1]. Це вимагає систематизації та переосмислення підходів до оцінки безпечності та клінічної ефективності протезної продукції. Україна не стикалася раніше із таким обсягом та специфікою експертизи протезної продукції, що потребуватиме нових підходів щодо

стратегій проектування, виготовлення та нагляду за використанням такої медичної продукції. Ці проблеми наразі не мають системного рішення.

Одним із вузьких місць у протезуванні є виготовлення куксоприймачів. Цей елемент протезу який має високу ступінь персоналізації. При його виготовленні застосовуються вкрай застарілі технології, які базуються на роботі з гіпсом, передбачають багатоетапність процесу, велику кількість примірювань та значні витрати часу протезистів, від кваліфікації, а інколи й від таланту яких залежить якість результату протезування. Відсутність

достатньої кількості професійних протезистів та часу на їх підготовку і навчання призводить до необхідності пошуку інноваційних підходів та нових технологій для рішення цієї задачі. Ми вбачаємо вирішення через міждисциплінарний підхід, який включає практичні аспекти протезування та реабілітації, знання про сучасні матеріали, застосування автоматизованого проектування складних поверхонь та новітніх технологій виготовлення деталей, зокрема таких як адитивні.

II. МЕТА РОБОТИ

Метою проведеного дослідження є здійснення аналізу існуючих видів та технологій виготовлення куксоприймачів нижніх кінцівок для здійснення подальших досліджень та розробок, що дозволять покращити і спростити технологічний процес виготовлення куксоприймачів які відповідають запиту.

III. МЕТОДИ

Огляд літературних даних було проведено за допомогою аналізу інформації з баз даних PubMed, Web of Science, Scopus, Google Scholar та інших джерел до 2024 року включно, використовуючи ключові слова: "протезування", "кукса", "гільзи протезів", "протези", "ампутація".

IV. КЛАСИФІКАЦІЯ РІЗНИХ ТИПІВ ГІЛЬЗ, АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ І НЕДОЛІКІВ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Гільзи протезів відіграють ключову роль у комфорті та функціональності протезів. Вони є інтерфейсом між протезом і тілом користувача, тому їхній дизайн та матеріали повинні бути вибрані з особливою увагою. Розглянемо основні аспекти, на яких ми акцентуємо увагу у цій статті для класифікації гільз протезів:

Типи гільз за призначенням:

Транстібіальні гільзи використовують для ампутацій кінцівок нижче коліна (рис. 1). Вони забезпечують хорошу фіксацію та зниження навантаження на залишкову частину ноги [2].



Рис. 1. Протези ноги нижче коліна з транстібіальною гільзою

Трансфеморальні гільзи [3] призначені для ампутацій кінцівок вище коліна (рис. 2). Вони допомагають ефективно передавати вагу від тулуба до протезу, забезпечуючи контроль і стабільність під час ходьби. Вони зазвичай мають більш складну конструкцію порівняно з транстібіальними гільзами, оскільки повинні компенсувати втрату великої частини ноги, що включає стегно.



Рис. 2. Протези ноги вище коліна з трансфеморальною гільзою

Для класифікації гільз за матеріалами, розглянемо чотири найпоширеніших та найпопулярніших матеріали.

Силікон - найпопулярніший матеріал через його комфорт та гнучкість. Силікон також гіпоалергенний і добре пристосовується до форми тіла. Його почали використовувати у медицині ще в першій половині 20 століття, завдяки унікальним властивостям, таким як гідрофобність, низький поверхневий натяг, хімічна стабільність, біологічна сумісність і термостійкість, він став популярним матеріалом для виготовлення гільз. Цей матеріал забезпечує підвищений комфорт, кращу переносимість агресивного дизайну

гнізда, а також кращий захист крихкої шкіри. Однак силіконові гільзи мають деякі недоліки. Наприклад, вони можуть швидше зношуватися, якщо їх порівняти з іншими матеріалами, за умови постійного динамічного використання. Крім того, деякі користувачі можуть відчувати дискомфорт або тертя під час тривалого носіння через специфічні характеристики матеріалу [4].

Поліуретан - використовується для створення більш жорстких гільз, які забезпечують високий рівень контролю. Такі гільзи є ще одним популярним варіантом у протезуванні кінцівок, так як відносяться до таких, що мають високу міцність та стійкі до зношування, це робить їх довговічними та надійними. Поліуретанові гільзи широко використовуються для виробництва протезів, забезпечуючи комфорт та стабільність користувачам.

Вони можуть бути сформованими та адаптованими для відповідності різним контурам залишкової кінцівки, що забезпечує високий рівень комфорту. Однак поліуретанові гільзи можуть бути важкими та дорожчими порівняно з іншими матеріалами, що може бути незручним для частини користувачів. Також, вони можуть мати обмежену гнучкість, а це призводить до обмежень у русі [5].

Поліетилен відноситься до одного з найпопулярніших матеріалів для виготовлення гільз протезів, особливо для дітей [6]. Цей матеріал вирізняється своєю легкістю та довговічністю, що робить його ідеальним вибором для активного життя молодших користувачів. Поліетилен не тільки міцний, але й стійкий до ударів та пошкоджень, що є критично важливим для дитячих протезів, які можуть піддаватися значним навантаженням під час гри та інших активностей.

Однак, поліетилен має і свої недоліки. Однією з основних проблем є його температурна чутливість: матеріал може деформуватися при високих температурах, що вимагає додаткової уваги при зберіганні та догляді. Також, хоча поліетилен і є довговічним, він може не забезпечувати такий же рівень комфорту, як більш м'які

матеріали типу силікону, особливо при тривалому носінні. Це може викликати дискомфорт у користувачів, особливо при чутливій шкірі або при необхідності тісного контакту гільзи зі шкірою. Тому, важливо ретельно обрати тип гільзи залежно від індивідуальних потреб та умов експлуатації.

Для досягнення оптимальних властивостей при виготовленні композитних гільз використовують комбінацію різних матеріалів, таких як карбонові волокна, скловолокно та полімери [7-8]. Ці гільзи можуть бути більш легкими та міцними, порівняно з іншими типами гільз і надають користувачам комфорт та ефективну підтримку. Композитні гільзи використовують комбінацію різних матеріалів для досягнення оптимальних властивостей. Наприклад, деякі композитні матеріали можуть бути легкими, що полегшує носіння та зменшує втому. Однак виробництво композитних гільз може вимагати більш складних та трудомістких процесів, що може підвищити їх вартість. Також, композитні гільзи можуть бути менш стійкими до зношування порівняно з іншими матеріалами, що може збільшити їхню вразливість до пошкоджень та потребувати частішої заміни.

Технології фіксації:

Вакуумні системи фіксації (рис. 3) протезів забезпечують високий рівень фіксації та стабільності за допомогою створення вакууму між гільзою протезу та шкірою користувача. Це дозволяє мінімізувати рух гільзи відносно кінцівки, знижуючи таким чином ризик подразнення та покращуючи загальний комфорт користувача.



Рис. 3. Вакуумна система фіксації протезів

Перевагами вакуумної системи фіксації є покращена адгезія: вакуум допомагає утримувати протез на місці, запобігаючи його "сковзанню" під час активностей. Зменшення подразнень: зменшує тертя і тиск на шкіру, знижуючи ризик виникнення ран та подразнень. Підвищена стабільність при ходьбі та інших фізичних активностях, підвищує ефективність кроку та знижує втому [9-10].

Механічні системи фіксації включають реміні, манжети, пояси, кліпси та інші механічні замки, які забезпечують фіксацію протеза через прямий контакт з гільзою [11]. Вони дозволяють користувачам легко налаштовувати та знімати протези, забезпечуючи при цьому міцне з'єднання.



Рис. 4. Приклади механічної фіксації протезів

Механічна система фіксації проста у використанні. Вона легко налаштовується та обслуговується, що є зручним для користувачів у повсякденному житті та більш економічним рішенням порівняно з іншими типами фіксаційних систем. Механічні замки забезпечують стабільне та надійне прилягання, мінімізуючи ризик від'єднання під час активностей.

Гелеві покриття - додають додатковий шар м'якості та можуть допомагати в зменшенні подразнення шкіри [11].



Рис. 5. Гелевий носок для протезів

Вони використовуються в протезуванні для покращення комфорту, забезпечення м'якості та амортизації між протезом та шкірою. Гелеві матеріали забезпечують м'якість та комфорт при контакті з шкірою, що допомагає уникнути тертя та подразнень. Вони допомагають зменшити навантаження на тканини та кістки, що зменшує ризик появи виразок та травм, при цьому дозволяють протезу налаштовуватися до форми тіла користувача, що забезпечує краще прилягання та стабільність [11].

Методи виготовлення:

Традиційне лиття - використовує моделі ніг для створення форм, за якими формується гільза.



Рис. 6. Процес виготовлення куксоприймача

3D-друк - дозволяє створювати гільзи, що ідеально пасують до форми залишкової кінцівки з великою точністю.

V. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА КОМФОРТНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРОТЕЗІВ

Комфорт використання протезу суттєво впливає на якість життя людини з ампутацією. Мінімізація болю та дискомфорту в місці з'єднання протеза із

куксою покращує психологічний стан і сприяє відновленню звичного життя. Виходячи з цього важливим є врахування факторів, які можуть викликати дискомфорт, для їх подальшого усунення [12].

Основні чинники, які можуть ускладнювати використання протезу, включають: механічні та анатомічні обмеження, невірне прилягання гільзи, нестабільність протезу, нерівномірне розподілення навантаження, тощо.

Невірне розташування протезу може стати причиною нерівномірного розподілу тепла і збільшення тертя, що призводить до подразнень та пошкоджень шкіри, може викликати додатковий біль і зношуваність суглобів.

Дослідження, представлене у статті [13], виявило, що помилки у розташуванні куксоприймачів призводять до нерівномірного розподілу тепла у передній, задній, та бічних частинах кукси. Коректно встановлений протез забезпечує людям з ампутацією можливість адаптуватися до повсякденного життя. Водночас, неправильне розміщення протезу часто призводить до кульгавості, неправильного розподілу навантаження на гільзу, збільшення тертя, і, як результат, до поверхневих пошкоджень тканин (рис. 7). Це, у свою чергу, може викликати другорядні захворювання опорно-рухової системи, такі як біль у кінцівки (куксі), у попереку і остеоартрит.

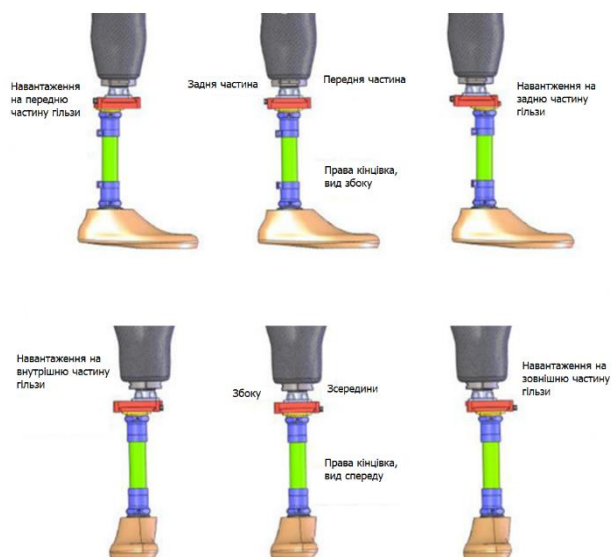


Рис. 7. Способи встановлення протезної системи

Регулювання встановлення гнізда трансфеморального протезу методом аддукції є розповсюдженою практикою, що ґрунтується на анатомічному вирівнюванні стегнової кістки здорової ноги. Цей процес підтримує м'язи, відповідальні за відведення стегна, забезпечує стабілізацію таза та мінімізує небажані рухи в області таза та кульшового суглоба. Згідно з результатами дослідження, опублікованому у [14], правильне розташування протезної гільзи має значний вплив на орієнтацію таза у фронтальній площині, нахил плечей і тулуба, а також на розподіл навантажень на хребет під час руху.

Люди з ампутуваними нижніми кінцівками можуть зіткнутися з особливими труднощами під час ходьби по сходах, оскільки втрата опорно-рухової та частини нервово-м'язової систем координації обмежують їхні можливості [15-16]. Долання підйомів і спусків, які є звичним елементом повсякденного життя, представляє збільшену складність через необхідність більшого діапазону рухів та зусиль. Внаслідок відсутності кінцівок або їх частин, що зазвичай допомагають врівноважувати та підтримувати тіло, ходьба на сходах може спричинити додатковий фізичний тиск та викликати функціональні обмеження.

Однією з поширених проблем для людей, які користуються протезом однієї з нижніх кінцівок, є асиметрична хода, коли здорова кінцівка піддається більшому навантаженню (рис. 8). Довготривала нерівномірність у розподілі ваги може призвести до зношування суглобів на здоровій нозі, особливо впливаючи на колінний суглоб, де обмеження рухливості може спричинити розвиток артрозу.

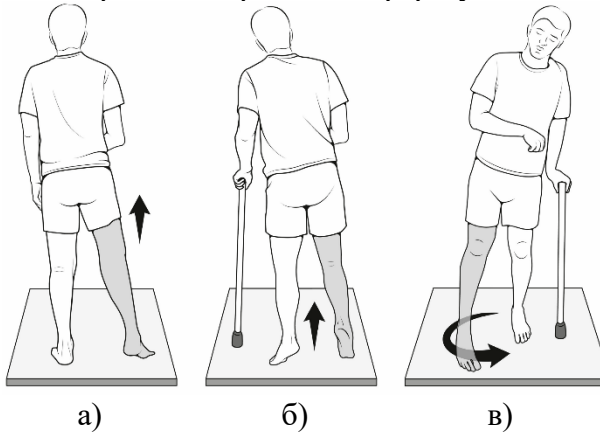


Рис. 8. Компенсаторні моделі ходи: а) хода зі стегна, б) стрибки, в) циркумдукція

Хоча дослідження показують, що рухові здібності людей з сучасними протезами часто нагадують характеристики людей без ампутацій, вони все ще не відтворюють точно властивості м'язів, які генерують силу з нейронним контролем. Дискомфорт від самого куксоприймача також може впливати на користувачів. Проблеми з пропріоцепцією, втрата точності в сприйнятті рухів, а також потреба в переносі навантаження між залишковою кінцівкою та куксоприймачем створюють додаткові обмеження для користувачів протезів [17-18].

Механічні та анатомічні вади можуть впливати на здатність пацієнта рухатися та користуватися протезом під час його створення та регулювання. До механічних обмежень належать такі аспекти, як ампутація з обмеженим об'ємом м'язової тканини, нестабільність або порушення в суглобах, дефекти будови кісток чи м'язів, а також інші вроджені або придбані дефекти, що можуть вплинути на ефективність протезу.

VI. ВІДКРИТІ ВИКЛИКИ В ЦЬЙ ГАЛУЗІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Протезування відіграє ключову роль у відновленні функціональності та рухливості втрачених кінцівок, надаючи можливість постраждалим особам повернутися до активного життя [19-20]. Куксоприймачі, які є основними елементами для фіксації протезів, забезпечують необхідну стабільність і комфорт при їх використанні. Проте, попри значні досягнення в області протезування, існують виклики, пов'язані з виготовленням і точним калібруванням протезних гільз, які можуть ускладнити процес адаптації до протезу і обмежувати його функціональність. Адресація цих викликів є важливою для ефективнішого відновлення і реінтеграції постраждалих у суспільство.

Ключові проблеми, що стосуються виробництва куксоприймачів, охоплюють кілька аспектів:

- необхідність персоналізації кожного виробу, що вимагає індивідуального підходу до кожного випадку;
- вимога до високої кваліфікації протезистів, які повинні володіти глибокими знаннями і навичками;
- суттєві часові витрати як з боку пацієнтів, так і медичних працівників, зокрема на етапах відвідування, примірювання та підгонки протезів;
- забезпечення комфорту і точності форми куксоприймачів, що безпосередньо контактують з тканинами людини, що важливо для збереження функціональності м'язів, які активно використовувались до ампутації.

При першому використанні протезу часто виникають незручності, що вимагають його налаштування для оптимального комфорту та розподілу навантаження, що може зменшити знос його компонентів та підвищити ефективність використання [21]. Зазвичай, для досягнення більшої зручності, з протезу видаляють шар матеріалу в місцях, де це може заважати комфортному носінню. Однак, навіть сучасні гільзи, які добре пристосовані до взаємодії з куксою, часто не враховують унікальні анатомічні

особливості кожного користувача, залишаючи ідеальний комфорт недосяжним у багатьох випадках.

Під час різних видів ходьби, як на рівній поверхні, так і при підйомі вгору чи спуску вниз, положення кістки змінюється, що впливає на навантаження різних суглобів та м'язових груп. Ці зміни орієнтації кісток спричиняють варіації в м'язовому навантаженні, що може призвести до перерозподілу ваги на різні частини гільзи. Цей перерозподіл є важливим для забезпечення рівномірного навантаження та запобігання перевантаження окремих ділянок гільзи, що може призвести до дискомфорту або травм.

Оскільки протез не відреагує на змінене розташування кістки та перерозподіл навантажень, основний тиск переходить на живу тканину, що стикається з куксоприймачем [22]. Це може призвести до дискомфорту при використанні, травм користувача та пошкодження пристрою, вимагаючи від людини адаптувати своє положення та спосіб ходьби до особливостей протезу. Щоб оптимізувати комфорт та функціональність, протез повинен бути точно адаптований до анатомії та рухів користувача. Замість простого видалення надлишкового матеріалу, потрібно переглянути внутрішнє наповнення гільзи, забезпечити її здатність до пластичної взаємодії з тканинами, використовуючи елементи з еластичності або «ефектом пам'яті» [23]. Забезпечення ідеального прилягання гільзи до шкіри зменшує тертя та знижує ризик дискомфорту під час носіння.

Як виявлено в дослідженні [20], одні з найбільш дискомфортних умов використання протезів ноги — це ходьба вгору по сходах і спуск по схилу. Експеримент показав, що максимальний тиск, який чиниться на сухожилля коліна, досягає 215 МПа при підйомі сходами, тоді як в підколінній області цей тиск складає 196 МПа під час спуску. Ці значні коливання тиску під час різних видів руху потребують створення ділянок у гільзі, що можуть забезпечити більшу пластичність та амортизацію в зонах з найвищим

навантаженням, щоб мінімізувати дискомфорт у місцях контакту.

Виробництво куксоприймачів є часомістким, складним і вартісним процесом, який також включає детальне калібрування протезу та індивідуальну реабілітаційну роботу з кожним пацієнтом [24]. Скорочення тривалості виробництва, автоматизація процесів та підвищення точності виробу можуть істотно покращити цю галузь. Застосування CAD-систем з відповідним використанням адитивного виробництва, такого як 3D-друк, дозволить створювати куксоприймачі, які точно відповідають анатомічним особливостям кожної особи, значно знижуючи необхідність у тривалій підгонці протезів.

Діти є одними з найактивніших користувачів протезів, часто потребуючи спеціалізованих педіатричних компонентів для участі в різноманітних видах діяльності на високому рівні. Великою проблемою є регулярна зміна ваги та зросту, через що потрібно часто замінювати складові. Наразі велика кількість дітей користується окремими протезами для щоденного використання та для певних видів діяльності, тому що не існує "швидкороз'ємних" з'єднувачів, які дозволяють легко перемикатися між стопами, хоча підлітки й дорослі таке мають. На сьогодні можна встановлювати ендопротез відносно рано, навіть коли малюки ще повзають, але все ще не існує ідеально розробленого наколінника дитячого розміру для переходу від лазання до ходьби. Існують деякі гідравлічні або пневматичні протези колінних суглобів, які також мають підвищену стабільність, зазвичай вони розраховані на дітей віком від 7 до 14 років, але не існує для молодшого віку, які, тим не менш, ходять і бігають [6].

VII. АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОДИН З ЕФЕКТИВНИХ ШЛЯХІВ РІШЕННЯ

Одним із найперспективніших видів технологій, який може стати на допомозі у вирішенні вказаних недоліків є адитивні. Вони мають революційний потенціал у тому числі у ортопедії та протезуванні, процесу виготовлення за рахунок покращення

можливостей індивідуального налаштування, зменшення виробничого часу і відходів, що, зрештою, призводить до кращих загальних результатів.

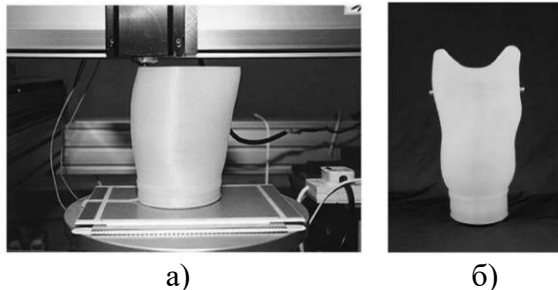


Рис. 9. Процес створення (а) та готовий (б) куксоприймач

На сьогодні існують технологічні рішення виготовлення куксоприймачів за допомогою адитивних технологій.

Використання 3D-друку, змінили підходи до виготовлення протезних гільз, пропонуючи значні переваги у точності, швидкості виробництва та індивідуалізації.

Процес створення гільз за допомогою адитивних технологій включає 4 основні кроки. Початковим етапом є 3D сканування залишкової кінцівки пацієнта для створення детальної цифрової моделі. Далі, використовуючи програмне забезпечення САД, модель може бути адаптована, щоб врахувати індивідуальні особливості пацієнта. Після чого модель переноситься на 3D принтер, який виготовляє куксоприймач, шар за шаром, з використанням пластиків або композитних матеріалів. І вже готовий куксоприймач може бути подальше оброблений для забезпечення комфорту та точності прилягання. Після цього він тестується на пацієнті для оцінки фітінгу та комфорту.

Однією з ключових переваг адитивних технологій є здатність до високої персоналізації та швидкого виробництва. Це особливо цінно в ситуаціях, коли потрібно швидко адаптувати або вдосконалити куксоприймач через зміни в залишковій кінцівці пацієнта. Крім того, 3D друк дозволяє створювати складні геометричні форми, які були б недоступні традиційними методами виробництва.

Використання цих технологій також сприяє розвитку нових матеріалів та методів проектування, що може призвести до покращення якості життя пацієнтів з ампутаціями. Проаналізовано ряд виробників та стан проблеми використання 3D друку. Основною вимогою до куксоприймачів є безпеність у використанні та зручність для пацієнтів. Його довговічність повинна забезпечуватися як для екстремальних статичних, так і для довготривалих циклічних навантажень. Досліди доводять що безпека не є результатом метода виробництва, а залежить від впливу геометрії та дизайну продукту. Підхід до проектування та тестування є ключем до створення безпечних і функціональних продуктів. Таким чином, необхідно встановити найкращі практики 3D-друку для створення куксоприймачів, які відповідають стандартам якості, міцності, зручності, комфорту та безпеки. Ця область досліджень, наразі недостатньо розвинена.

Ось деякі аспекти, на які ми спрямовуємо свої подальші дослідження:

Матеріали: Розробка більш міцних, гнучких та легких матеріалів для виготовлення протезів, які б відповідали різним потребам користувачів.

Ергономіка і комфорт: Дослідження оптимальних форм та конструкцій протезів для забезпечення максимальної зручності та комфорту для користувачів.

Підгонка та індивідуалізація: Розробка методів для індивідуальної підгонки протезів до потреб конкретного користувача, зокрема за допомогою сканування та моделювання.

Функціональність: Дослідження можливостей використання різних технологій (наприклад, датчики, мотори тощо) для покращення функціональності протезів.

VII. ВИСНОВКИ

У статті проведено комплексний аналіз наукової літератури, видів матеріалів для виробництва куксоприймачів та методів їх фіксації. Обговорено переваги та недоліки різних матеріалів і технологій, що застосовуються у сфері протезування, а

також окреслено можливі напрямки для інновацій. Значну увагу приділено аналізу ключових факторів, які впливають на комфорт і функціональність протезів: правильну підгонку, стабільність та рівномірний розподіл навантаження, що мають вирішальне значення для психологічного стану та адаптації користувачів.

Виділено ключові виклики, з якими стикаються виробники та користувачі протезів, включаючи потребу в персоналізації, зменшення часу на виробництво, підвищення точності готових виробів. Адитивні технології визначено як перспективний напрямок, що може сприяти розв'язанню цих проблем.

Описано потреби для подальших дослідженнях для вдосконалення матеріалів, технологій та методів взаємодії протезів з користувачами, з метою забезпечення більшої комфортності та ефективності протезів.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID

0000-0001-7950-4655 (A, D,E) Nataliia Seminska

0000-0001-8255-3909 (A, B, C) Olha Musiienko

0000-0002-0226-2691 (A, B, C) Ivanna Slobodianiuk

0009-0009-3016-0818 (B, C) Kseniia Belevets

0009-0001-3759-2674 (B, C) Anna Stepanova

0009-0008-7890-4073 (B, C) Nataliia Shytikova

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pancevski B. In Ukraine, Amputations Already Evoke Scale of World War I [Електронний ресурс] / Bojan Pancevski // The Wall Street Journal. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wsj.com/articles/in-ukraine-a-surge-in-amputations-reveals-the-human-cost-of-russias-war-d0bca320>.
2. Transtibial (Below Knee) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.albertaoandp.com/transtibial-below-knee>.
3. Transfemoral (Above Knee) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.albertaoandp.com/transfemoral-above-knee>.

4. Potok B. All About Prosthetic Liners: Part 2 Choosing the best material. [Електронний ресурс] / Bryan Potok. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://amputeestore.com/blogs/amputee-life/prosthetic-liners-silicone-gel-differences>.
5. Applications of polyurethanes in orthopedic technology [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://360-ot.de/wp-content/uploads/2019/10/3109_SD_Schmidt_11_08_ger.pdf.
6. M. Hall etc., “Innovations in Pediatric Prosthetics”, J. Pediatric Orthopaedic Soc. North America, т. 3, № 1, 2021. <https://doi.org/10.55275/jposna-2021-221>
7. M. S. Scholz та ін., “The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review”, Composites Sci. Technol., т. 71, № 16, с. 1791–1803, листоп. 2011. Дата звернення: 11 трав. 2024. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.017>
8. Y. R. Nagarajan, F. Farukh, A. Buis та K. Kandan, “Single Polymer Composites: An Innovative Solution for Lower Limb Prosthetic Sockets”, Prosthesis, т. 6, № 3, с. 457–477, квіт. 2024. Доступно: <https://doi.org/10.3390/prosthesis6030033>
9. Y. R. Nagarajan, F. Farukh, A. Buis та K. Kandan, “Single Polymer Composites: An Innovative Solution for Lower Limb Prosthetic Sockets”, Prosthesis, т. 6, № 3, с. 457–477, квіт. 2024. Доступно: <https://doi.org/10.3390/prosthesis6030033>
10. Y. R. Nagarajan, F. Farukh, A. Buis та K. Kandan, “Single Polymer Composites: An Innovative Solution for Lower Limb Prosthetic Sockets”, Prosthesis, т. 6, № 3, с. 457–477, квіт. 2024. Доступно: <https://doi.org/10.3390/prosthesis6030033>
11. Suspension Systems [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pw.co.nz/products/categories/suspension-systems>.
12. Степанова А. А. Основні параметри, що спричиняють дискомфорт для пацієнтів з трансфеморальними ампутаціями / А. А. Степанова, О. С. Мусієнко, Н. В. Семінська. // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні 2024". – 2024.
13. Cárdenas AM, Uribe J, Font-Llagunes JM, Hernández AM, Plata JA. The effect of prosthetic alignment on the stump temperature and ground reaction forces during gait in transfemoral amputees. Gait Posture. 2022 Jun; 95:76-83. doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.04.003. Epub 2022 Apr 6. PMID: 35461047.
14. Köhler TM, Blumentritt S, Braatz F, Bellmann M. The impact of transfemoral socket adduction on pelvic and trunk stabilization during level walking - A biomechanical study. Gait Posture. 2021 Sep;89:169-177. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.06.024. Epub 2021 Jul 2. PMID: 34311436.
15. Sound side trunk muscles contribute to trunk control during prosthetic gait in persons with unilateral transfemoral amputation / S. Scharr et al. Gait & Posture. 2021. Vol. 90. P. 230–231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.09.119>
16. Gholizadeh H, Lemaire ED, Sinitski EH. Transtibial amputee gait during slope walking with the unity suspension system. Gait Posture. 2018 Sep;65:205-212. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.07.059. Epub 2018 Jul 26. PMID: 30558933.
17. Белевець К.С. Відкриті виклики в галузі створення куксоприймачів та можливі рішення щодо вдосконалення конструкції / К.С. Белевець, О.С. Мусієнко, Н.В. Семінська // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні 2024". – 2024.
18. Winiarski S., Rutkowska-Kucharska A., Kowal M. Symmetry function – An effective tool for evaluating the gait

symmetry of trans-femoral amputees. *Gait & Posture*. 2021. Vol. 90. P. 9–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.07.021>

19. Jarvis HL, Reeves ND, Twiste M, Phillip RD, Etherington J, Bennett AN. Can high-functioning amputees with state-of-the-art prosthetics walk normally? A kinematic and dynamic study of 40 individuals. *Ann Phys Rehabil Med*. 2021 Jan;64(1):101395. doi: 10.1016/j.rehab.2020.04.007. Epub 2020 Aug 26. PMID: 32450271.

20. Dou P, Jia X, Suo S, Wang R, Zhang M. Pressure distribution at the stump/socket interface in transtibial amputees during walking on stairs, slope and non-flat road. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2006 Dec;21(10):1067-73. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2006.06.004. Epub 2006 Aug 17. PMID: 16919376.

21. V. Rajtukova, R. Hudak, J. Zivcak, P. Halfarova та R. Kudrikova, “Pressure Distribution in Transtibial Prostheses

Socket and the Stump Interface”, *Procedia Eng.*, т. 96, с. 374–381, 2014.

22. M. Mohseni-Dargah, C. Pastras, P. Mukherjee, K. Cheng, K. Khajeh та M. Asadnia, “Performance of personalised prosthesis under static pressure: Numerical analysis and experimental validation”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, с. 106396, сiч. 2024.

23. A. Ballit, I. Mougharbel, H. Ghaziri та T. T. Dao, “Fast Soft Tissue Deformation and Stump-Socket Interaction Toward a Computer-Aided Design System for Lower Limb Prostheses”, *IRBM*, т. 41, № 5, с. 276–285, жовт. 2020.

24. Y. R. Nagarajan, F. Farukh, A. Buis та K. Kandan, “Single Polymer Composites: An Innovative Solution for Lower Limb Prosthetic Sockets”, *Prosthesis*, т. 6, № 3, с. 457–477, 2024. <https://doi.org/10.3390/prosthesis6030033>

UDC 615.477.23

MANUFACTURE OF LOWER LIMB PROSTHESES: CHALLENGES, ANALYSIS, AND POSSIBLE SOLUTIONS

Nataliia Seminska
seminska@ukr.net

Olha Musiienko

olga.musinko@gmail.com

Ivanna Slobodianiuk

slobodianiuk.ivanna@lil.kpi.ua

Kseniia Belevets

k.belevets02@gmail.com

Anna Stepanova

annastrekoza03@gmail.com

Nataliia Shytikova

natalia.02.shytikova@gmail.com

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Abstract Currently, our country is facing numerous challenges, to which we are directing our utmost efforts and attention. Key tasks include human resource recovery, post-conflict economic rehabilitation, and the social reintegration of those affected by military actions, ensuring they can lead full lives. In front-line areas, especially where active combat occurs, many risk serious injuries that could lead to complete or partial limb loss. This poses complex tasks for the medical and scientific communities in providing necessary support and rehabilitation. This article focuses on the importance of producing socket receivers, which are key components in the design of lower limb prostheses. Emphasis is placed on the need for personalization and precision in their production, especially in the context of an increasing number of amputations requiring a revision and optimization of outdated technological processes. The authors reviewed existing approaches and innovative methods, including additive technologies, which can contribute to more efficient production and improved quality of prosthetic products. The article also discusses various materials for sockets, fixation methods, and the impact of these aspects on the comfort and functionality of prostheses. The research and recommendations presented in the article aim to further develop the prosthetics industry in Ukraine, improve the quality of life of the affected individuals, and their social adaptation and reintegration. An important part of the analysis is the examination of the main parameters that affect the effectiveness and acceptability of prostheses. Engineering approaches have been proposed to address these critical issues.

Keywords –Amputation Stumps, Artificial Limbs, Leg, Prosthesis Design, Silicones, Socket, Additive manufacturing,