

**ЮНГІН ІВАН**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0009-0009-9446-1564>  
e-mail: [junginivan@gmail.com](mailto:junginivan@gmail.com)

**МОКРОУСОВА ОЛЕНА**

Державний торговельно-економічний університет  
Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0003-1943-8048>  
e-mail: [olenamokrousova@gmail.com](mailto:olenamokrousova@gmail.com)

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ БІОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ПРОТЕЗНИХ ЛАЙНЕРІВ

Робота присвячена обґрунтуванню особливостей структури й властивостей сучасних матеріалів для протезних лайнерів та дослідженню якості натуральних шкір як альтернативних матеріалів біогенного походження протезного призначення. Показано, що інноваційний підхід у створенні матеріалів для виготовлення протезних лайнерів передбачає формування композиційних матеріалів на основі різнофункціональних складників або формування матеріалів з необхідним комплексом функціональних властивостей. Встановлено, що матеріали для лайнерів повинні характеризуватись відповідною структурою, яка здатна витримувати механічні та динамічні навантаження при різних температурах та вологості, забезпечувати співвідношення міцності до маси, легко пристосовуватись до форми кінцівки, не викликати потертостей. В композиційних матеріалах зазначені характеристики досягаються цілеспрямованим підбором структурної матриці та полімерного матеріалу. Доведено, що змінюючи матрицю, об'ємну частку волокнистих матеріалів та полімерну композиційну складову можна коригувати жорсткість, міцність та анізотропні властивості функціонального матеріалу для лайнерів, забезпечувати анатомічне прилягання та оптимальну продуктивність протезу. У порівнянні з композиційними матеріалами показано, що натуральні шкіри мають унікальну ієрархічну колагенову структуру, об'ємну та капілярно-пористу матрицю для комплексного забезпечення необхідних функціональних властивостей, фіксації протезних лайнерів та їх здатності пристосовуватися до контурів кульги зі збереженням загального комфорту. Оцінено хімічний склад, фізичні, фізико-механічні та гігієнічні властивості напівфабрикатів протезних шкір бахтарманих та лицьових зразків відповідно до нормативних вимог. Встановлено, що натуральні шкіри комплексно забезпечують необхідні функціональні властивості як матеріали біогенного походження для лайнерів, що ґрунтуються на унікальній капілярно-пористій структурі дерми та її трансформації в результаті хімічних взаємодій та дії технологічних матеріалів.

**Ключові слова:** лайнер, протези, композиційні матеріали, функціональні властивості, шкіра

**IUNGIN IVAN**

Kyiv National University of Technologies and Design  
**MOKROUSOVA OLENA**  
State University of Trade and Economics  
Kyiv National University of Technologies and Design

## FUNCTIONAL MATERIALS OF BIOLOGICAL ORIGIN FOR PROSTHETIC LINERS

This work is dedicated to substantiating the structural features and properties of modern materials used for prosthetic liners and investigating the quality of natural leathers as materials of biogenic prosthetic origin for liner fabrication. It is demonstrated that the innovative approach to creating materials for prosthetic liners involves either the formation of composite materials based on multi-functional components or the development of materials exhibiting a necessary complex of functional properties. It is established that liner materials must be characterized by a suitable structure capable of withstanding mechanical and dynamic loads across varying temperatures and humidity, ensuring an optimal strength-to-mass ratio, easily conforming to the shape of the limb, and preventing chafing. In composite materials, these characteristics are achieved through the deliberate selection of the structural matrix and the polymer material. It is proven that by modifying the matrix, the volume fraction of fibrous materials, and the polymeric composite component, it is possible to adjust the stiffness, strength, and anisotropic properties of the functional liner material, thereby ensuring anatomical fit and optimal prosthetic performance. In comparison with composite materials, it is shown that natural leathers possess a unique hierarchical collagen structure, a voluminous and capillary-porous matrix, which collectively provide the necessary functional properties for fixing prosthetic liners and their ability to conform to the residual limb contours while preserving overall comfort. The chemical composition, physical, physico-mechanical, and hygienic properties of semi-finished prosthetic leathers (both split/flesh-side and grain-side samples) were evaluated according to regulatory requirements. It is determined that natural leathers comprehensively provide the requisite functional properties as biogenic materials for liners, a capability rooted in the unique capillary-porous structure of the dermis and its transformation resulting from chemical interactions and the action of technological processing materials.

**Keywords:** liner, prosthesis, composite materials, functional properties, natural leather

Стаття надійшла до редакції / Received 18.11.2025  
Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026  
Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Юнгін Іван, Мокроусова Олена

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Світова тенденція останніх п'яти років спостерігається у зростанні кількості випадків ампутації нижніх кінцівок. Щорічно понад 80 % усіх ампутацій у світі пов'язані з хронічними захворюваннями, пов'язаними зі

способом життя, такими як цукровий діабет та периферичні судинні захворювання [1]. З цієї позиції, демографічна ситуація на пряму вказує, що найближчим часом, потенційно, мільйони пацієнтів потребуватимуть негайної високоякісної протезної допомоги. З іншої позиції, останні глобальні події у світі спричиняють стрімкий ріст кількості травматичних ампутацій. Сучасні збройні конфлікти створюють унікальну групу пацієнтів, травми яких, часто пов'язані зі складними вибуховими uszkodженнями, вимагають протезів, що відповідають безпрецедентним стандартам міцності, комфорту та функціональності.

Ця нагальна потреба найгостріше проявляється в Україні, де повномасштабне вторгнення з 2022 року призвело до критичної кризи в галузі охорони здоров'я, пов'язаної з втратою кінцівок [2]. Масштаби кризи вимагають керованого підходу. Авторитетні джерела та міжнародні медичні консорціуми оцінюють, що з лютого 2022 року десятки тисяч військовослужбовців та цивільних осіб зазнали часткової або повної втрати кінцівок. Ці статистичні дані значно перевищують показники до війни, що обумовлює потребу в протезній реабілітації в країні. Важливо, що переважна більшість ушкоджень (>70%) є наслідком вибухової травми (міни, артилерія, ракети), що призводить до специфічного клінічного профілю, такого як складне пошкодження тканин, яке вимагає використання функціональних матеріалів з високою еластичністю, ергономічністю та захисною дією [3]. Крім того, значну частину пацієнтів становлять молоді, активні люди, яким потрібні протези, здатні витримувати інтенсивне та тривале механічне навантаження.

Цей особливий профіль травм кардинально відрізняється від діабетичної етіології, поширеної в усьому світі, і потребує матеріалів, здатних витримувати високі механічні навантаження, забезпечуючи при цьому чудовий захист пошкодженої культу [4]. Вирішення цього національного пріоритету вимагає радикальної переоцінки сучасних протезних технологій, розширення меж матеріалознавства для розробки рішень, що підтримують довгострокову мобільність та реабілітацію пацієнтів.

#### **Аналіз досліджень та публікацій**

Протезування кінцівок передбачає заміщення функції та зовнішнього вигляду частини тіла (кінцівок) людини із забезпеченням функціональності та комфортності, на що суттєвий вплив створює правильний та цілеспрямований вибір матеріалів для виготовлення деталей протезу [5]. Особливо проблемними залишаються питання підбору матеріалів для захисту м'яких тканин залишкових частин нижніх кінцівок після ампутації. В результаті протезування нижня частина кінцівок зазнає суттєвих навантажень, результатом чого є виникнення натертостей, інфікування шрамів, накопичення бактерій. Негативні прояви посилюються функціональними особливостями людського організму, а саме, потовиділенням, нерегульованою терморегуляцією, появою набряків тощо. За результатами спостережень [6] виявлено, що в 70 % протезування проблемним є питання потовиділення та підвищення температури поверхні частини кінцівок, що оточена деталями протезу. Причина пов'язана із збільшенням на 10-44 % енергетичних затрат людини під час рухів у протезі. В лайнері – основній частині протезу, поверхня якого безпосередньо прилягає до шкіряного покриву кінцівки, створюється особливий мікроклімат, який характеризують як вологий, підвищеної температури та насичений бактеріями [7, 8]. Для усунення зазначених особливостей фізіології людини та забезпечення мінімального негативного відчуття дискомфорту під час використання протезу важливе значення має правильний підбір матеріалів для виготовлення лайнерів.

Інноваційний підхід у створенні матеріалів для виготовлення лайнерів передбачає формування композиційних матеріалів на основі різнофункціональних властивостей або формування матеріалів з необхідним комплексом функціональних властивостей. При цьому лайнер повинен забезпечувати щільне прилягання, рівномірно розподіляти динамічне навантаження та тиск, мінімізувати подразнення шкіри людини, ефективно регулювати потовиділення, не ініціювати алергічні реакції. Достатньо перспективним напрямом є отримання функціональних матеріалів на основі шкіряної сировини біогенного походження, переробка якої забезпечує цілеспрямоване формування колагенової структури дерми та її властивостей як основи матеріалів для лайнерів. В зв'язку з цим, критичний аналіз літературних джерел та комплексне обґрунтування технологічних підходів та інновацій є необхідною складовою розробки сучасних та багатофункціональних матеріалів для виготовлення лайнерів.

#### **Формулювання цілей статті**

**Метою роботи є:** дослідження особливостей структури та властивостей сучасних матеріалів для протезних лайнерів та встановлення перспектив використання натуральних шкір як матеріалу біогенного походження для їх виготовлення.

**Об'єктом** дослідження є властивості матеріалів для протезних лайнерів. **Предмет** дослідження – закономірності формування структури та властивостей натуральних шкір як матеріалу біогенного походження для забезпечення функціональності протезних лайнерів.

Для дослідження використано загальнонаукові та спеціальні методи аналізу, системного підходу, наукового узагальнення та порівняння даних наукових джерел (публікації вітчизняних та закордонних науковців).

#### **Виклад основного матеріалу**

Функціональні матеріали для лайнерів протезів передбачають одночасне забезпечення таких властивостей, як – міцність, легкість, стійкість до багаторазових вигинів в умовах підвищеної вологості та температури, збереження механічної стійкості під час інтенсивних та довготривалих навантажень, високі гігієнічні властивості (повітропроникність, гіроскопічність), безпечний хімічний склад та біосумісність з

шкіряним покривом людини. Узагальнений аналіз дозволяє класифікувати властивості матеріалів за групами на: фізичні, механічні, гігієнічні, хімічні та біологічні (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація властивостей та показники функціональних матеріалів для лайнерів

Відповідно до рис 1. фізичні властивості функціональних матеріалів для лайнерів оцінюються за масою матеріалу, особливо через співвідношення міцності матеріалу до його маси; товщиною та об'ємним виходом для забезпечення деформаційних характеристик, пористістю для надання необхідної повітропроникності та гігроскопічності. Механічні властивості матеріалів характеризуються міцністю до динамічних навантажень та стійкістю до багаторазових вигинів, при цьому повинні бути пружними та еластичними щоб швидко пристосовуватись до форми культі та підтримувати набуту форму під час експлуатації протезів. Структура матеріалу визначає певний рівень гігієнічних властивостей, особливо таких показників, як повітропроникності, температурної збереженості та гігроскопічності. Комплекс хімічних та біологічних властивостей є доказом безпечності матеріалу для лайнеру через відсутність небезпечних хімічних матеріалів та стійкість до біологічно активних об'єктів.

Для комплексного забезпечення зазначеного переліку властивостей та їх показників (рис. 1) матеріали для лайнерів повинні володіти необхідною структурою, здатною витримувати механічні та динамічні навантаження при різних температурах та вологості, бути легкими та забезпечувати відповідне співвідношення «міцність-легкість», легко пристосовуватись до форми кінцівки, оточувати кінцівку та не викликати виникнення потертостей.

Інноваційні напрями забезпечення комплексу функціональних властивостей передбачають створення композиційних матеріалів. При цьому один складник композиційного матеріалу забезпечує, як правило, вимоги до міцності, має певну структуру та відграє функцію матриці, а також характеризується стійкістю до багаторазових згинань, забезпечує деформацію. Інший складник композиційного матеріалу надає, наприклад, необхідних гігієнічних характеристик, а саме, ефективно відводить зайве тепло, забезпечує хорошу повітропроникність, амортизацію, є інертним до мікробіофлори тощо.

Відповідно до зазначених інноваційних підходів набули ефективного використання матеріали на основі еластомерів з поліетиленовою, поліуретановою або силіконовою основою у вигляді гідрогелів або аерогелів для останніх. Аерогелі забезпечують хорошу повітропроникність, мають здатність регулювати температуру в середині лайнера. Гідрогелі здатні ефективно відводити зайву вологу та надають достатні амортизаційні характеристики. Дослідження [9] зазначають високий потенціал аерогелів силікону для протезних лайнерів, оскільки надають хорошу повітропроникність та вологорегуляцію. При цьому присутність кремнію забезпечує гідрофобні властивості матеріалам для лайнерів, що вказує на потенційне зменшення накопичення поту в лайнері та покращення мікроклімату в середині лайнера для шкіри людини.

Для структурування полімерного складника функціонального матеріалу використовують різні за походженням волокна, в тому числі текстильні волокна природного чи хімічного походження, або карбоволокна, вуглецеві трубки тощо. З роботи [10] відомо, що матриці на основі вуглецевого волокна, кевлару чи скловолокна, можна розділити на три категорії за механічною міцністю: найслабшими є матриці з волокон перлону або нігласу, спектралону, нейлону та бавовни, міцність яких становить від 18 до 42 МПа; середній діапазон міцності характерний для скловолокна з межами від 67 до 109 МПа; найвищий рівень міцності забезпечують вуглецеві волокна в межах від 236 до 249 МПа.

Композиційні матеріали з матрицею із вуглецевого волокна (CFRP) використовують в протезуванні з урахуванням співвідношення міцності та маси, а також біосумісності [10, 11]. CFRP матеріали мають переваги над традиційними матрицями на основі інших металів у вирішенні проблем протидії навантаженням при заміні суглобів [11]. Для протезних гільз CFRP матеріали демонструють кращі механічні властивості порівняно з іншими матеріалами. Дослідження показало, що структура вуглецевого волокна має вищу міцність на згин, стійкість до зсувного напруження та ударну міцність порівняно з джутовим або скловолокном [12]. Виявлено [13], що лайнери з матеріалів на основі вуглецевого волокна показують порівняно з перлоном вищий рівень

міцності на розрив і стійкість до навантажень під час експлуатації. Позитивним є високий рівень безпечності матеріалів на основі вуглецевого волокна (коефіцієнт безпеки – 1,35 порівняно з 0,22 для перлону).

Порівняно з матрицями композиційних матеріалів для лайнерів на основі вуглецевого волокна використання волокон кевлару здатне забезпечити підвищену міцність та довговічність, а просочення матриці полімерними компонентами може сприяти необхідному рівню еластичності, повітропроникності і гігроскопічності.

Відомі композиційні матеріали у вигляді тришарової структури з вуглецевою матрицею, легким пінопластовим наповнювачем та м'якою уретановою поверхнею [14]. Ці композиційні матеріали застосовуються в технологіях лиття на основі адитивного виробництва для друку протезів рук та інших високопродуктивних протезів кінцівок. Серед інших компонентів композиційних матеріалів можна використовувати графен або вуглецеві нанотрубки для надання підвищеної міцності та відносно низької щільності. Загалом, використання композиційних матеріалів у проектуванні та виготовленні протезних вкладишів є перспективним напрямком досліджень і розробок.

На сьогоднішній день доведено, що змінюючи матрицю, об'ємну частку волокнистих матеріалів та полімерну композиційну складову можна коригувати жорсткість, міцність та анізотропні властивості функціонального матеріалу для лайнерів, забезпечувати анатомічне прилягання та оптимальну продуктивність протезу. Технології адитивного виробництва, такі як 3D-друк, дозволяють виготовляти складні протезні лайнери, з індивідуальним пристосуванням під кожного пацієнта зі складною внутрішньою геометрією та текстурою поверхні [15].

Поряд із використанням сучасних матеріалів та технологій у виробництві лайнерів для протезів, відомо, що натуральна шкіра як матеріал біогенного походження до сих пір залишається альтернативою у випадку унікальних рішень для протезування, пов'язаних з протезною фіксацією та комфортом [16]. Властивості натуральної шкіри, включаючи її багаторівневу та ієрархічну колагенову структуру, об'ємну та капілярно-пористу матрицю, ергономічність, повітропроникність, гігроскопічність та здатність пристосовуватися до контурів культі, роблять її потенційно придатною для покращення загального комфорту та фіксації протезних лайнерів, особливо у групах населення, де використання вакуумних або силіконових композитів може бути обмеженим [16].

Відповідно до нормативного документу [17] натуральні шкіри для протезів виготовляють із шкур овець, поділяючи за товщиною від 0,8 до 1,1 мм та площею на групи: від 40 до 60 дм<sup>2</sup>, та вище 60 дм<sup>2</sup>. Основні вимоги стосуються хімічного складу натуральних шкір. За хімічним складом шкіри нормуються за вмістом вологи, вмістом золи, речовин, що екстрагуються органічними розчинниками та вмістом сполук хрому. За фізико-механічними показниками шкіри повинні відповідати вимогам за межею міцністю при розтягненні та видовженні при напруженні 10 МПа (табл. 1).

Матеріали, що контактують з тілом людини, треба перевірити на біосумісність, враховуючи використання за призначенням та контактом під час обслуговування та зберігання протезу. Також зазначено, що шкіра для протезів повинна мати рівномірний ворс з бахтармяної сторони та ретельно відшліфовану гладку поверхню з іншої сторони.

Таблиця 1

## Вимоги до якості протезних шкір

№	Показник	Одиниці вимірювання	Числове значення
1	Вміст:		
	– вологи	%, не більше	16
	– золи	%, не більше	7
	– речовин, що екстрагуються органічними розчинниками	%, не більше	8
	– оксиду хрому	%, не менше	3
2	Межа міцності при розтягненні	×10 МПа, не менше	1,2
3	Видовження при напруженні 10 МПа	%, не менше	60

Для виготовлення протезних шкір з хромового напівфабрикату (ворсового та лицьового) використано матеріали рідинного оздоблення фірми Smit & Zoon [19] для додублювання-наповнювання (Syntan S, Synthol YY 707, Syntan RS 540, Syntan LF 187, Syntan DF 585, Syntan SN, Syntan GP) та жирування (Syntan FP 124, Synthol EW 321, Synthol DS 606), з витратами, відповідно від маси струганого напівфабрикату, мас. %: 2, 1, 4, 3, 3, 2, 3 та 2, 4, 2. Після рідинних процесів зразки напівфабрикатів шкіри висушували при температурі з почерговим розтягненням, зволоженням та досушуванням в умовах конвекції.

Оцінювання властивостей напівфабрикатів протезних шкір здійснювали за показниками хімічного складу, фізичними, фізико-механічними та гігієнічними. Результати досліджень представлено в табл. 2.

За аналізом отриманих даних встановлено, що натуральні шкіри комплексно забезпечують необхідні функціональні властивості як матеріали біогенного походження для лайнерів. Показники хімічного складу та фізико-механічних властивостей, які нормуються вимогами до протезних шкір, повністю відповідають встановленим рівням за вмістом вологи, золи, речовин, що екстрагуються органічними розчинниками та оксидом хрому. Виявлено, що для напівфабрикату лицьових зразків протезних шкір вміст вологи, речовин, що екстрагуються органічними розчинниками та оксиду хрому перевищує ідентичні показники напівфабрикату

бахтармянних зразків протезних шкір, відповідно, на 21 %, 6,5 % та 6,1 %. Вміст золи на 9,8 % більше для напівфабрикату бахтармянних зразків протезних шкір.

Таблиця 2

## Показники протезних шкір

Показник	Вид напівфабрикату протезних шкір	
	Бахтармянний	Лицьовий
<i>Фізичні властивості</i>		
Товщина, мм	1,0	1,1
Площа, мм <sup>2</sup>	60,0	60,0
Об'ємний вихід, см <sup>3</sup> /100 г білка		
<i>Хімічний склад</i>		
Вміст води, %	11,5	14,5
Вміст, % на суху речовину:		
– золи	8,2	7,4
– речовин, що екстрагуються органічними розчинниками	5,8	6,2
– оксиду хрому	6,2	6,6
<i>Фізико-механічні властивості</i>		
Межа міцності при розтязі, МПа	1,2	1,3
Видовження при навантаженні 10 МПа, %	60,0	65,0
Видовження при розриві, %	65,0	71,0
<i>Гігієнічні властивості</i>		
Повітропроникність, см <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> ×год	654	721
Паропроникність, мг/см <sup>2</sup> ×год	3,2	3,5
Пористість, %	68,0	65,0

На вказані особливості впливає структура дерми натуральних шкір та особливості взаємодії хімічних сполук із функціональними групами та активними центрами колагену дерми. Відсутність у бахтармянних зразків щільного лицьового шару та наявність більш крунопористої структури дерми забезпечує більшу фізичну абсорбцію мінеральних складових технологічних матеріалів. Це явище впливає і на рівень вмісту води в бахтармянних зразках і на менший рівень показників фізико-механічних властивостей. Наявність лицьового шару для лицевих зразків протезних шкір та особливості гістологічної будови дерми сприяють досягненню вищих значень межі міцності та видовження в середньому на 7,7 – 8,4 %.

Слід вказати на високий рівень гігієнічних властивостей натуральних шкір як матеріалу для лайнерів. Сформована під час обробки капілярно-пориста структура характеризується повітропроникністю на рівні 654-721 см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>×год та суттєвим значенням пористості 65,0-68,0 %. При цьому структурування елементів дерми та хімічні зв'язки активних груп колагену з хімічними матеріалами в результаті обробки шкір забезпечують здатність дерми сорбувати пари зайвої води, що підтверджено рівнем паропроникності 3,2-3,5 мг/см<sup>2</sup>×год.

Аналіз представлених досліджень (табл. 2) свідчить про якісне формування комплексу різнофункціональних властивостей натуральних шкір, що ґрунтується на унікальній капілярно-пористій структурі дерми та її трансформації в результаті хімічних взаємодій та дії технологічних матеріалів. Загалом, зазначене підтверджує здатність використання натуральних шкір як альтернативних матеріалів для лайнерів.

## Висновки з даного дослідження

## і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі зроблено обґрунтування характерних ознак структури та властивостей сучасних матеріалів для протезних лайнерів. Інноваційний підхід ґрунтується на створенні композиційних матеріалів для виготовлення протезних лайнерів на основі різнофункціональних складників або матеріалів з необхідним комплексом функціональних властивостей. Встановлено, що в композиційному матеріалі для протезного лайнеру необхідні функціональні механічні, фізичні та гігієнічні характеристики досягаються цілеспрямованим підбором структурної матриці та полімерного складника. Доведено, що змінюючи матрицю, об'ємну частку волокнистих матеріалів та полімерну композиційну складову можна коригувати жорсткість, міцність та анізотропні властивості функціонального матеріалу для лайнерів, забезпечувати анатомічне прилягання та оптимальну продуктивність протезу.

Натуральна шкіра як альтернатива композиційним матеріалам має унікальну ієрархічну колагенову структуру, об'ємну та капілярно-пористу матрицю, що обумовлює можливість комплексного забезпечення необхідних функціональних властивостей для протезних лайнерів, в тому числі, здатності пристосовуватися до контурів культі зі збереженням загального комфорту при використанні протезу. Відповідно до завдань роботи здійснено виготовлення бахтармянних та лицевих зразків протезних шкір з хромового напівфабрикату та оцінено їх хімічний склад, фізичні, фізико-механічні та гігієнічні властивості відповідно до нормативних вимог. Встановлено, що отримані натуральні шкіри комплексно забезпечують необхідні функціональні властивості як матеріали біогенного походження для лайнерів, що ґрунтується на унікальній капілярно-пористій структурі дерми та її трансформації в результаті хімічних взаємодій та дії технологічних матеріалів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на можливість екологізації процесу дублення та наповнювання протезних шкір та використанні рослинних дубителів.

### Література

1. McDonald, C. L., Westcott-McCoy, S., Weaver, M. R., Haagsma, J., & Kartin, D. (2021). Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthetics and orthotics international*, 45(2), 105–114 . <https://doi.org/10.1177/0309364620972258>.
2. Trutyak, I., Malickii, V., Samotowka, M., Trunkvalter, V., Trutyak, R., & Ivaschenko, V. (2023). Problematic issues of limb amputation in wounded with combat trauma. *Proceeding of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*, 72(2), 4 p. <https://doi.org/10.25040/ntsh>
3. Lysak, A., Gaiovych, V., Strafun, S., & Shypunov, V. (2025). Ukrainian Orthopedic Trauma Experience in Managing Wartime Injuries of the Upper Extremity, *Hand Clinics*, 41(3), 373–385 <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2025.03.012>.
4. Plesec, V., & Harih, G. (2024). Bioinspired Design of 3D-Printed Cellular Metamaterial Prosthetic Liners for Enhanced Comfort and Stability. *Biomimetics*, 9(9), 540. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9090540>.
5. Klute, G. K., Glaister, B. C., & Berge, J. S. (2010). Prosthetic liners for lower limb amputees: a review of the literature. *Prosthetics and orthotics international*, 34(2), 146–153. DOI: 10.3109/03093641003645528
6. McGrath, M., Mccarthy, J., Gallego, A., Kercher, A., Zahedi, S., & Moser, D. (2019). The influence of perforated prosthetic liners on residual limb wound healing: a case report. *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, 2(1), 32723. <https://doi.org/10.33137/cpoj.v2i1.32723>
7. Silver-Thorn, B., Steege, J. W., & Childress, D. S. (1996). A review of prosthetic interface stress investigations. *Journal of rehabilitation research and development*. Veterans Administration. 253–266. [https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1307&context=bioengin\\_fac](https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1307&context=bioengin_fac)
8. Sankaran, S., Murugan, P. R., Johnson, J. C., Abdullah, H. J. S., Raj, C. M. N., & Ashokan, D. (2019). Prevention of skin problems in patients using prosthetic limb: A review of current technologies and limitations. In *2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*. 0077–0081. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2019.8698111>
9. Lee, W. J., Park, J. H., Yoon, S. H., Kim, H. J., Jung, H. S., & Kim, J. H. (2020). Silica aerogels for prosthetic liner applications. *Biomedical Materials*, 15(4), 045008. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00814-y>.
10. Tryggvason, H., Starker, F., Lecompte, Ch., Jónsdóttir, F. (2017). Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot. *Proceedings of the 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58)*. Linköping Electronic Conference Proceedings. 138:53, p. 398–405. <http://dx.doi.org/10.3384/ecp17138398>.
11. Ceddia, M., & Trentadue, B. (2024). A review of carbon fiber-reinforced polymer composite used to solve stress shielding in total hip replacement. *AIMS Materials Science*, 11(3), 449–462. <https://doi.org/10.3934/matserci.2024023>.
12. Mohammed, M., Adam, T., Mohammed, A., Oleiwi, J., & Betar, B. (2024). A systematic review of natural fiber-reinforced polymer composites in prosthetic socket fabrication. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 2(1), 99–106. <https://doi.org/10.61268/dnr76d24>.
13. Abbas, E. N., Al-Waily, M., Hammza, T. M., & Jweeg, M. J. (2020). An investigation to the effects of impact strength on laminated notched composites used in prosthetic sockets manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 928(2), 022081. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022081>.
14. Bhatt, S., Joshi, D., Rakesh, P. K., & Godiyal, A. K. (2023). Advances in additive manufacturing processes and their use for the fabrication of lower limb prosthetic devices. *Expert review of medical devices*, 20(1), 17–27. <https://doi.org/10.1080/17434440.2023.2169130>.
15. Allen, Q., & Raeymaekers, B. (2021). Surface texturing of prosthetic hip implant bearing surfaces: a review. *Journal of Tribology*, 143(4), 040801 . <https://doi.org/10.1115/1.4048409>.
16. Wendland, T. M., Séguin, B., & Duerr, F. M. (2023). Prospective evaluation of canine partial limb amputation with socket prostheses. *Wiley*, 9(4), 1521–1533 . <https://doi.org/10.1002/vms3.1146>.
17. ДСТУ EN ISO 22523:2015 Зовнішні протези кінцівок та зовнішні ортези. Вимоги та методи випробування (EN ISO 22523:2006, DT). Чинний від 01-04-2016. 75 с.
18. Wet and Chemicals. Checklist. Smit and Zoon. URL: <https://www.smitzoon.com/en/leather-chemicals/wet-end/>.

### References

1. McDonald, C. L., Westcott-McCoy, S., Weaver, M. R., Haagsma, J., & Kartin, D. (2021). Global prevalence of traumatic non-fatal limb amputation. *Prosthetics and orthotics international*, 45(2), 105–114 . <https://doi.org/10.1177/0309364620972258>.
2. Trutyak, I., Malickii, V., Samotowka, M., Trunkvalter, V., Trutyak, R., & Ivaschenko, V. (2023). Problematic issues of limb amputation in wounded with combat trauma. *Proceeding of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*, 72(2), 4 p. <https://doi.org/10.25040/ntsh>
3. Lysak, A., Gaiovych, V., Strafun, S., & Shypunov, V. (2025). Ukrainian Orthopedic Trauma Experience in Managing Wartime Injuries of the Upper Extremity, *Hand Clinics*, 41(3), 373–385 <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2025.03.012>.

4. Plesec, V., & Harih, G. (2024). Bioinspired Design of 3D-Printed Cellular Metamaterial Prosthetic Liners for Enhanced Comfort and Stability. *Biomimetics*, 9(9), 540. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9090540>.
5. Klute, G. K., Glaister, B. C., & Berge, J. S. (2010). Prosthetic liners for lower limb amputees: a review of the literature. *Prosthetics and orthotics international*, 34(2), 146–153. DOI: 10.3109/03093641003645528
6. McGrath, M., Mccarthy, J., Gallego, A., Kercher, A., Zahedi, S., & Moser, D. (2019). The influence of perforated prosthetic liners on residual limb wound healing: a case report. *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, 2(1), 32723. <https://doi.org/10.33137/cpoj.v2i1.32723>
7. Silver-Thorn, B., Steege, J. W., & Childress, D. S. (1996). A review of prosthetic interface stress investigations. *Journal of rehabilitation research and development*. Veterans Administration. 253–266. [https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1307&context=bioengin\\_fac](https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1307&context=bioengin_fac)
8. Sankaran, S., Murugan, P. R., Johnson, J. C., Abdullah, H. J. S., Raj, C. M. N., & Ashokan, D. (2019). Prevention of skin problems in patients using prosthetic limb: A review of current technologies and limitations. In *2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCCSP)*. 0077–0081. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCSP.2019.8698111>
9. Lee, W. J., Park, J. H., Yoon, S. H., Kim, H. J., Jung, H. S., & Kim, J. H. (2020). Silica aerogels for prosthetic liner applications. *Biomedical Materials*, 15(4), 045008. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00814-y>.
10. Tryggvason, H., Starker, F., Lecompte, Ch., Jónsdóttir, F. (2017). Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot. *Proceedings of the 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58)*. Linköping Electronic Conference Proceedings. 138:53, p. 398-405. <http://dx.doi.org/10.3384/ecp17138398>.
11. Ceddia, M., & Trentadue, B. (2024). A review of carbon fiber-reinforced polymer composite used to solve stress shielding in total hip replacement. *AIMS Materials Science*, 11(3), 449–462. <https://doi.org/10.3934/matasci.2024023>.
12. Mohammed, M., Adam, T., Mohammed, A., Oleiwi, J., & Betar, B. (2024). A systematic review of natural fiber-reinforced polymer composites in prosthetic socket fabrication. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 2(1), 99–106. <https://doi.org/10.61268/dmr76d24>.
13. Abbas, E. N., Al-Waily, M., Hammza, T. M., & Jweeg, M. J. (2020). An investigation to the effects of impact strength on laminated notched composites used in prosthetic sockets manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 928(2), 022081. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022081>.
14. Bhatt, S., Joshi, D., Rakesh, P. K., & Godiyal, A. K. (2023). Advances in additive manufacturing processes and their use for the fabrication of lower limb prosthetic devices. *Expert review of medical devices*, 20(1), 17–27. <https://doi.org/10.1080/17434440.2023.2169130>.
15. Allen, Q., & Raeymaekers, B. (2021). Surface texturing of prosthetic hip implant bearing surfaces: a review. *Journal of Tribology*, 143(4), 040801. <https://doi.org/10.1115/1.4048409>.
16. Wendland, T. M., Séguin, B., & Duerr, F. M. (2023). Prospective evaluation of canine partial limb amputation with socket prostheses. *Wiley*, 9(4), 1521–1533. <https://doi.org/10.1002/vms3.1146>.
17. DSTU EN ISO 22523:2015 Zovnishni protezy kintsivok ta zovnishni ortezy. Vymohy ta metody vyprovuvannya (EN ISO 22523:2006, DT). Chynnyi vid 01-04-2016. 75 s.
18. Wet and Chemicals. Checklist. Smit and Zoon. URL: <https://www.smitzoon.com/en/leather-chemicals/wet-end/>