

Актуальні проблеми та напрями досліджень технологічних процесів з'єднання в сучасних біомеханічних системах протезування

У статті розглянуто технологічні процеси з'єднання у біомеханічних системах протезування як один із ключових чинників, що визначають функціональність, надійність, ергономічність і довговічність протезно-ортопедичних конструкцій. Актуальність теми зумовлена тим, що якість з'єднувальних вузлів безпосередньо впливає на точність просторового розташування компонентів протеза, передачу навантаження, комфорт користувача та безпечність експлуатації виробу. Метою статті є узагальнення сучасних підходів до реалізації технологічних процесів з'єднання у біомеханічних системах протезування, виявлення основних технологічних проблем, що виникають під час виготовлення і складання з'єднувальних вузлів, а також оцінювання впливу точності таких з'єднань на експлуатаційні характеристики протезів. Дослідження має оглядовий характер і ґрунтується на аналізі українських та зарубіжних наукових публікацій, навчальних видань, технічної документації й сучасних прикладних розробок у сфері протезування, біомеханіки, комп'ютерного проектування та комп'ютерного виготовлення CAD/CAM, 3D-сканування та адитивного виробництва. У статті проаналізовано основні типи з'єднань, що застосовуються в протезах, зокрема жорсткі модульні, гвинтові, шарнірні та комбіновані вузли, а також розглянуто характерні проблеми, пов'язані з порушенням співвісності, відхиленнями посадок, нестабільністю фіксації, появою люфтів, похибками цифрового моделювання та дефектами 3D-друкованих елементів. Установлено, що навіть незначні неточності з'єднання здатні спричиняти зміну осі навантаження, погіршення розподілу тиску в системі «кукса – гільза – протез», зниження стійкості ходьби, прискорене зношування деталей і дискомфорт пацієнта. Показано, що сучасні цифрові технології розширюють можливості індивідуалізації протезів і підвищення точності їх виготовлення, проте водночас висувають жорсткіші вимоги до контролю геометрії, матеріалів, параметрів друку та постобробки. Зроблено висновок, що технологічні процеси з'єднання слід розглядати як критичний елемент виготовлення біомеханічних систем протезування, від якого залежить не лише конструктивна цілісність виробу, а й його клінічна ефективність, а перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методів контролю точності, довговічності та цифрового проектування з'єднувальних вузлів.

Ключові слова: біомеханічні системи протезування; технологічні процеси з'єднання; протезно-ортопедичні конструкції; з'єднувальні вузли; точність складання; CAD/CAM; 3D-сканування; адитивне виробництво; біосумісні матеріали; ергономіка протеза.

Актуальність теми. У сучасних біомеханічних системах протезування технологічні процеси з'єднання є одним із ключових етапів виготовлення, оскільки саме вони забезпечують формування цілісної конструкції з окремих функціональних елементів – приймальної гільзи, адаптерів, штифтів, втулок, шарнірних вузлів, кріпильних компонентів, модульних з'єднувачів та елементів, виготовлених адитивними методами [1; 2]. На відміну від загальномашинобудівних виробів, у протезно-ортопедичних конструкціях з'єднання працюють в умовах змінних циклічних навантажень, багаторазових повторюваних рухів, локального контакту з тілом людини та підвищених вимог до точності взаємного розташування деталей. Тому будь-яка похибка на етапі виготовлення або складання таких вузлів безпосередньо впливає не лише на технічний стан конструкції, а й на функціональність, комфорт і безпеку користувача [3; 4].

Технологічні процеси з'єднання в системах протезування охоплюють кілька взаємопов'язаних етапів: проектування стикувальних поверхонь, підбір матеріалів сумісних елементів, забезпечення точності посадок, виготовлення з'єднувальних деталей, їх механічне або модульне складання, а також контроль стабільності та геометричної відповідності вузлів [2; 5]. На кожному з цих етапів можуть виникати специфічні проблеми. Так, під час механічної обробки адаптерів і втулок можливими є відхилення розмірів, порушення співвісності, шорсткість або дефекти контактних поверхонь, що погіршують якість посадки деталей. У різьбових і модульних з'єднаннях поширеними проблемами є недостатня жорсткість фіксації, самовідгинчування під дією циклічного навантаження, концентрація напружень у зонах переходу та поступове зношування поверхонь контакту [2; 6]. У шарнірних вузлах додатково виникають питання точності кінематичної пари, люфтів, нерівномірного розподілу навантаження та зниження довговічності внаслідок тертя [1].

Окрему групу проблем становлять з'єднання, що формуються із застосуванням цифрових технологій і адитивного виробництва. Використання CAD/CAM, 3D-сканування та SLS/SLM-технологій суттєво розширює можливості індивідуалізації протезів, однак водночас ставить підвищені вимоги до точності цифрової моделі, коректності передавання геометрії, якості спікання матеріалу та відтворення розмірів стикувальних елементів [7; 8]. Навіть незначні похибки 3D-сканування або моделювання можуть призвести до невідповідності між спроектованим цифровими методами і фактично виготовленим вузлом, що особливо критично для посадочних поверхонь, місць кріплення та елементів, через які передається основне силове навантаження [8; 9]. Для полімерних та металевих 3D-друкованих компонентів додатковими проблемами можуть бути анізотропія властивостей, локальні дефекти структури, зміни геометрії за рахунок усадки та відхилення точності після постобробки [7; 10].

Недосконалість технологічних процесів з'єднання безпосередньо відображається на експлуатаційних характеристиках біомеханічної системи протезування. Порушення точності складання або нестабільність вузлів з'єднання можуть викликати зміщення осі навантаження, зміну кінематики руху, появу паразитних мікропереміщень, локальне перевантаження окремих ділянок приймальної гільзи та погіршення контакту між протезом і залишковою кінцівкою [3; 4; 11]. У практичному аспекті це призводить до дискомфорту пацієнта, підвищеного тиску на м'які тканини, погіршення стійкості під час ходьби, прискореного зношування деталей і необхідності частих коригувань або заміни окремих компонентів [3; 11]. Таким чином, проблема вдосконалення технологічних процесів з'єднання в протезуванні має не лише інженерне, а й безпосередньо клініко-реабілітаційне значення.

У зв'язку з цим важливим практичним завданням є розроблення та впровадження таких технологічних рішень, які забезпечують високу точність виготовлення з'єднувальних елементів, стабільність їх геометричних і силових параметрів, сумісність матеріалів, мінімізацію похибок складання та підвищення довговічності роботи вузлів [5; 7]. Для сучасного протезування це особливо актуально в умовах зростання потреби в індивідуалізованих виробах, скорочення строків виготовлення протезів і переходу до цифрових та адитивних технологій виробництва. Саме тому дослідження технологічних процесів з'єднання у біомеханічних системах протезування є необхідним напрямом для підвищення якості протезно-ортопедичних виробів, удосконалення їх функціональних характеристик і забезпечення ефективної реабілітації пацієнтів [7; 8; 10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Питання технологічних процесів з'єднання у біомеханічних системах протезування в сучасній літературі розглядається переважно в кількох взаємопов'язаних напрямках: дослідження конструктивної будови протезів і принципів формування їх вузлів, аналіз біомеханіки контакту між елементами протеза та тілом користувача, вивчення точності цифрового проектування і виготовлення, а також оцінювання можливостей сучасних матеріалів для з'єднувальних і несучих компонентів. В навчальних і науково-методичних виданнях увага зосереджується на загальних принципах побудови протезно-ортопедичних виробів, ролі модульних вузлів, особливостях механічного з'єднання складових елементів та вимогах до їх функціональної сумісності. Зокрема, у вітчизняних виданнях підкреслюється, що якість складання, точність посадки і стабільність з'єднань безпосередньо визначають працездатність і надійність протезної системи [1; 12].

Серед зарубіжних досліджень важливе місце посідають праці, присвячені механіці інтерфейсу «кукка – гільза протеза». У роботах [3] узагальнено сучасні методи вимірювання тиску, зсувних навантажень і мікропереміщень у зоні контакту, що дозволяє оцінювати наслідки похибок виготовлення й складання з'єднувальних елементів. Дослідження [4] показало, що навіть незначна зміна посадки гільзи впливає на розподіл тиску і зсуву в характерних анатомічних зонах, а отже, і на комфорт, безпечність навантаження та ефективність користування протезом. Такі роботи є важливими для розуміння того, що технологічна точність з'єднання має не лише конструктивне, а й виражене біомеханічне значення.

Окремий блок публікацій стосується цифровізації процесів виготовлення протезів. У сучасних оглядових роботах відзначається, що 3D-сканування, CAD/CAM-моделювання та цифрове виготовлення дають змогу підвищити відтворюваність геометрії, зменшити ручні похибки й покращити індивідуалізацію виробів [7; 8]. Подібні підходи відображені й у вітчизняних розробках, де описано застосування CAD/CAM-технологій, 3D-сканування та ЧПК-обробки для ортезно-протезних виробів, а також впровадження таких рішень у підготовку фахівців і практику вітчизняних підприємств [12; 13]. Це підтверджує, що технології цифрового формоутворення сьогодні розглядаються як один з основних шляхів підвищення точності з'єднувальних вузлів.

Важливими з точки зору процесів з'єднання є праці присвячені матеріалам і адитивному виробництву. У сучасних роботах наголошується на перспективності титанових сплавів для медичних і біомеханічних конструкцій завдяки їх біосумісності, високим механічним характеристикам і придатності до точного виготовлення складних елементів [2; 13]. Водночас огляди щодо 3D-друку ортезів і протезів демонструють, що адитивні технології відкривають можливості для персоналізованого виготовлення деталей складної геометрії, але водночас ставлять нові вимоги до точності посадочних поверхонь, якості кінцевої обробки та стабільності з'єднань у готовій конструкції [10; 7; 10].

Метою статті є виявлення основних технологічних проблем, що виникають під час виготовлення й складання з'єднувальних вузлів, а також узагальнення впливу точності та якості таких з'єднань на функціональність, ергономіку, надійність і експлуатаційні характеристики протезно-ортопедичних конструкцій. Для досягнення поставленої мети у статті передбачається розглянути основні типи з'єднань, що застосовуються у сучасних протезах; проаналізувати характерні технологічні дефекти й обмеження, пов'язані з їх виготовленням і складанням; охарактеризувати можливості CAD/CAM, 3D-сканування та адитивних технологій у підвищенні точності з'єднувальних елементів; а також узагальнити сучасні підходи, висвітлені в українських і зарубіжних наукових публікаціях та прикладних розробках.

Викладення основного матеріалу. Технологічні процеси з'єднання у біомеханічних системах протезування слід розглядати як сукупність операцій, що забезпечують просторове, силове та функціональне поєднання окремих елементів протеза в єдину систему. У конструкціях протезів нижніх і верхніх кінцівок такі процеси реалізуються під час приєднання приймальної гільзи до адаптерів, з'єднання адаптерів із несучими трубчастими або каркасними елементами, монтажу колінних, ліктьових і кистьових шарнірів, встановлення різьбових і пірамідальних з'єднувачів, а також інтеграції індивідуалізованих деталей, виготовлених за цифровими моделями. За даними Ottobock, у типових протезах нижньої кінцівки ключовими є гільза з лайнером і способом підвісу, колінний вузол і стопа (рис. 1), причому саме гільза має з'єднувальний адаптер для приєднання до інших компонентів системи [14]. У технічній документації Ottobock на трубчасті адаптери прямо вказано, що ці елементи використовуються як компоненти модульних протезів нижніх кінцівок, поєднуючи стопу з проксимальними елементами та забезпечуючи регулювання довжини, кутів і ротації [15; 16]. Це свідчить про те, що вузли з'єднання виконують не допоміжну, а базову функцію в архітектурі протеза, оскільки через них формується геометрія виробу, передається навантаження і забезпечується можливість індивідуального налаштування конструкції.

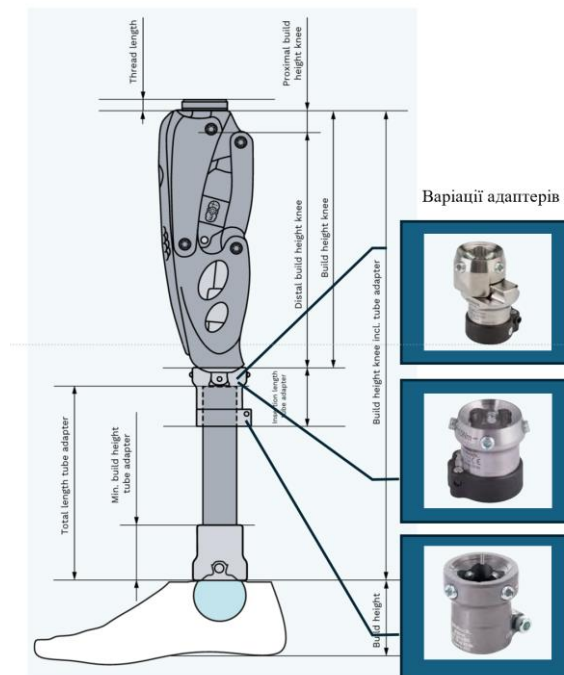


Рис. 1. Ключові компоненти протеза нижньої кінцівки та місце з'єднувального адаптера між гільзою і модульними елементами [14]

З інженерної точки зору у протезуванні доцільно виділяти кілька основних груп з'єднань: жорсткі нерухомі з'єднання, регульовані модульні з'єднання, шарнірні кінематичні вузли та комбіновані системи, у яких поєднуються механічне кріплення і пружні або полімерні проміжні елементи. Жорсткі нерухомі з'єднання застосовують там, де потрібно забезпечити стабільність геометрії й надійну передачу навантаження без втрати просторового положення елементів. Регульовані модульні вузли потрібні для точного налаштування висоти, фронтальних і сагітальних кутів, а також ротації, тобто для адаптації протеза до антропометричних особливостей пацієнта та біомеханіки його ходьби, фронтальних і сагітальних кутів, а також ротації, тобто фактично для точної адаптації протеза до антропометрії пацієнта і його біомеханіки ходьби. Шарнірні з'єднання формують керовану рухомість у колінних, ліктьових або кистьових вузлах і водночас потребують високої точності складання, оскільки навіть незначний люфт або перекіс може змінити кінематику всієї системи.

У технологічному аспекті формування якісного з'єднання починається значно раніше за остаточне складання. Першим етапом є забезпечення правильної геометрії стикувальних поверхонь і взаємної сумісності деталей. Для протезних систем це особливо важливо, оскільки посадка, співвісність і положення з'єднувального вузла впливають не лише на міцність, а й на розподіл тиску в системі «кюкса – гільза – протез». Дослідження механіки інтерфейсу показують, що навіть невеликі зміни посадки гільзи можуть змінювати локальний тиск і зсув у характерних анатомічних зонах, погіршуючи комфорт і безпечність користування протезом [3; 18; 19]. У роботі [3] наголошено, що кількісне вимірювання механіки інтерфейсу стало окремим напрямом досліджень саме тому, що проблеми посадки, мікропереміщень і локального перевантаження істотно впливають на функціонування протеза. Таким чином, технологія з'єднання в біомеханічних системах не може оцінюватися лише за критеріями складальної зручності або міцності; вона має розглядатися у зв'язку з біомеханікою контакту та клінічної ефективністю конструкції.

До типових проблем, що виникають під час виготовлення й складання з'єднувальних вузлів протезів, належать відхилення геометричних розмірів, порушення співвісності, шорсткість або дефекти контактних поверхонь, неповна посадка елементів, недостатній або надлишковий момент затягування гвинтових з'єднань, а також невідповідність між розрахунковим і фактичним положенням вузла після монтажу. У технічних інструкціях Ottobock (рис. 2) підкреслюється, що неправильне складання гвинтових з'єднань, забруднення різьби, недотримання заданого крутного моменту та неправильний монтаж труби можуть призвести до пошкодження несучих компонентів, послаблення вузла або навіть поломки під навантаженням [15]. Для клінічної практики це означає, що помилка в з'єднанні не обмежується локальним дефектом деталі, а може проявитися зміною ходи, порушенням взаємного положення компонентів, появою шумів, нестабільністю та прискореним зношуванням системи [15]. Отже, контроль технологічного процесу з'єднання має охоплювати не лише перевірку розмірів, а й контроль чистоти поверхонь, правильності монтажу, дотримання моменту затягування та стабільності положення вузла після навантаження.



Рис. 2. Вимоги та монтаж трубчастого адаптера в модульному протезі [15]

Важливою особливістю протезно-ортопедичних конструкцій є поєднання жорстких силових вузлів із зонами, чутливими до локальних перенавантажень. Саме тому дефекти з'єднання часто мають подвійний ефект: з одного боку, вони знижують надійність конструкції, а з іншого – погіршують умови контакту з тілом пацієнта. У літературі показано, що порушення посадки гільзи та зміни механіки інтерфейсу пов'язані з підвищенням ризику дискомфорту, ушкодження м'яких тканин і зниження керованості протезом [3; 4]. Огляд [19] також підкреслює, що розподіл тиску та сил у зоні контакту є одним із ключових чинників задоволеності пацієнта і функціональності протеза. У контексті технологічних процесів це означає, що точність формування з'єднувального ланцюга від гільзи до стопи або кистьового модуля визначає не лише положення механічних елементів, а й умови навантаження на живі тканини. Тому для біомеханічних систем протезування характерна тісна залежність між якістю складального процесу й ергономікою виробу.

Останніми роками суттєво змінилися й самі підходи до реалізації технологічних процесів з'єднання. Якщо традиційно формування гільзи та більшості вузлів значною мірою залежало від ручної роботи, то цифрової технології поступово переносять критичні операції у площину 3D-сканування, CAD-моделювання, САМ-підготовки та адитивного виробництва. Огляд [7] показує, що цифрові робочі процеси у виготовленні ортезів і протезів будуються навколо оцифрування анатомії, цифрової корекції моделі, комп'ютерного проектування та подальшого САМ або АМ-виготовлення виробу (рис. 3). У цьому ланцюгу саме точність переходу від сканованої форми до цифрової моделі й далі до фізичної деталі визначає, наскільки коректно будуть сформовані посадочні поверхні, отвори, місця кріплення та інші елементи з'єднання. Недостатня точність будь-якого етапу створює технологічну спадковість похибок, які накопичуються і проявляються вже під час складання або експлуатації.

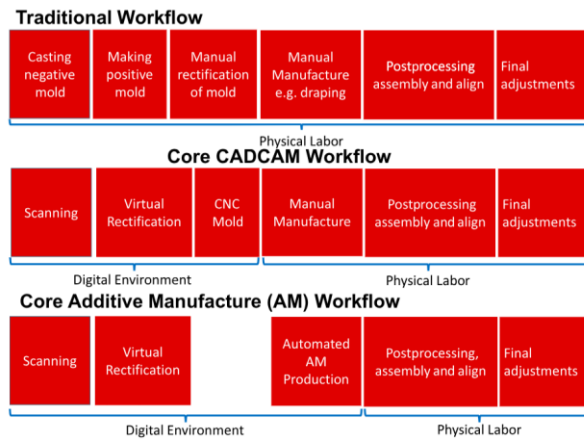


Рис. 3. Традиційний і цифровий робочі процеси виготовлення протезно-ортопедичних виробів: від отримання форми до CAD/CAM і адитивного виробництва [7]

Для індивідуалізованих протезів верхніх кінцівок цифрова логіка виробництва ще очевидніша. Open Bionics описує свій підхід як послідовність 3D-сканування кінцівки, цифрового проєктування та виготовлення конструкції з Nylon 12 (рис. 4), при цьому окремо підкреслюється комфортність, регульованість і повітропроникність гільзи [16]. Огляд клінічних результатів 3D-друкованих протезів 2025 року підтверджує, що технології 3D-друку є перспективними для індивідуалізації, але рівень доказовості клінічних переваг поки ще нерівномірний, а питання міцності, повторюваності та стандартизації залишаються актуальними [17].

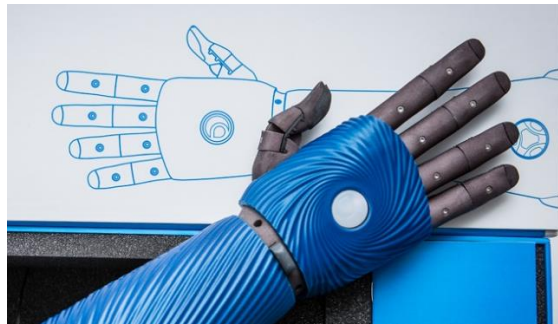


Рис. 4. Цифрово виготовлений протез верхньої кінцівки на основі 3D-сканування та друку з Nylon 12 [16]

Ще одним важливим напрямом розвитку є використання металевих адитивних технологій для виготовлення навантажених індивідуалізованих елементів з'єднання. Огляди з powder bed fusion та біомедичних титанових сплавів показують, що ці технології дозволяють отримувати складні за геометрією деталі з високим ступенем індивідуалізації, однак якість виробу суттєво залежить від керування пористістю, залишковими напруженнями, точністю побудови та післяобробкою [8; 18]. Для з'єднувальних компонентів біомеханічних систем це особливо важливо, оскільки такі деталі часто працюють у режимі змінних навантажень і мають зберігати точність посадочних поверхонь. Отже, перехід до адитивного виготовлення не усуває вимог до технологічної дисципліни, а навпаки робить їх більш жорсткими: контроль з'єднання починається вже на стадії цифрового проєктування й триває через параметри друку, термообробку, механічну доробку та остаточне складання.

Важливою складовою технологічних процесів з'єднання є вибір матеріалів для вузлів стикування. У протезно-ортопедичних конструкціях з'єднувальні елементи повинні поєднувати малу масу, достатню жорсткість, стійкість до втомного руйнування, корозійну стійкість і сумісність з іншими компонентами системи. Саме тому в навантажених адаптерах, пірамідальних з'єднувачах, втулках і шарнірних вузлах широко застосовуються титанові сплави, алюмінієві сплави та високоміцні сталі, тоді як у гільзах, лайнерах і частині індивідуалізованих деталей – полімерні композити або поліамідні матеріали [8; 10]. Огляд біомедичних застосувань титанових сплавів показує, що титан цінується за високу питому міцність, корозійну стійкість і біосумісність, а для біомеханічних систем це особливо важливо через поєднання малої маси виробу з високими вимогами до довговічності [8]. Водночас огляди 3D-друкованих протезів підкреслюють, що полімерні матеріали та інші термопласти, відкривають широкі можливості для індивідуалізації, але вимагають ретельного контролю геометрії, товщини стінок, анізотропії властивостей

і якості післяобробки [10; 17]. Отже, проблема технологічного з'єднання пов'язана не лише з формою вузла, а й з матеріальним поєднанням елементів, оскільки різна жорсткість, різні коефіцієнти тертя і різна чутливість до циклічного навантаження можуть змінювати поведінку всього протеза під час експлуатації.

Для модульних протезів нижніх кінцівок особливе значення має точність кутового та осевого налаштування з'єднувальних вузлів. Саме через адаптери і коригувальні елементи формується просторове положення стопи, гомілкового модуля, колінного вузла і гільзи відносно один одного. Якщо на етапі складання не забезпечено правильну співвісність або допущено похибку в ротаційному положенні, це призводить до зміни лінії дії реакції опори, порушення стабільності стояння і ходьби, збільшення енерговитрат та появи небажаних компенсаторних рухів [1; 3]. Сучасні клінічні й інженерні огляди підкреслюють, що оптимізація посадки і взаємного положення компонентів протеза безпосередньо пов'язана з більш рівномірним розподілом навантаження та комфортом пацієнта, а невідповідність положення елементів часто проявляється через скарги на нестійкість або локальний дискомфорт [3; 4; 5]. У цьому сенсі технологічні процеси з'єднання треба розуміти як процеси, що формують не тільки міцне кріплення, а й біомеханічно правильну геометрію всієї системи.

У цифровому виробництві проблема точності з'єднання набуває нової форми. Якщо в традиційній технології основним джерелом похибки були ручні операції формування та примірювання, то в цифровому ланцюзі критичними стають якість сканування, правильність побудови цифрової моделі, коректність CAD-параметризації та точність CAM або AM-виготовлення. В [8] показано, що 3D-сканери для ортезів і протезів суттєво відрізняються за точністю, стабільністю результату та придатністю до клінічної практики, а помилки на етапі оцифрування безпосередньо відображаються на геометрії індивідуалізованих виробів. Подібний висновок міститься і в сучасному огляді технологій цифрового виготовлення: цифрові методи потенційно зменшують ручні похибки, але вимагають стабільного, добре документованого процесу переходу від анатомічної форми до готової деталі [7]. Це особливо важливо для з'єднувальних поверхонь, посадочних місць, отворів, пазів і зон монтажу модульних елементів, де навіть невелика систематична похибка може призвести до люфту, перекосу або неможливості коректного складання вузла.

Українські роботи, присвячені застосуванню CAD/CAM і 3D-сканування в ортезуванні та протезуванні, також підтверджують важливість цього напрямку. У матеріалах [12] показано перспективність технологій 3D-сканування, цифрової обробки моделі та виготовлення індивідуалізованих виробів, зокрема наголошено на можливості формування типового технологічного процесу з вищою відтворюваністю параметрів [12; 20]. Хоча значна частина таких розробок присвячена ортезам (рис. 5), їх висновки безпосередньо релевантні й для протезних систем, оскільки принципова задача лишається спільною: забезпечити точне відтворення анатомічної форми, кероване формоутворення конструкції та стабільність параметрів під час виготовлення й складання.

Окремої уваги потребують шарнірні та рухомі з'єднання. На відміну від жорстких адаптерів, у таких вузлах проблема точності визначається не лише геометричною сумісністю деталей, а й забезпеченням прогнозованої кінематики. Для колінних, ліктьових і кистьових шарнірів критичними є точність осі обертання, мінімізація люфту, рівномірність розподілу контактних напружень і стабільність роботи під дією повторних циклів навантаження. У разі недостатньо точного складання шарнірний вузол може створювати додаткові паразитні рухи, нерівномірний знос, шум, а також знижувати точність керування протезом. Це особливо актуально для протезів верхніх кінцівок, де від якості вузлів приєднання й рухомих модулів залежить не тільки загальна надійність конструкції, а й точність виконання дрібних функціональних дій. Сучасні огляди 3D-друкованих і цифрово виготовлених протезів підкреслюють, що ускладнення часто виникають саме тоді, коли складна функціональна геометрія поєднується з недостатньою повторюваністю виробничого процесу [17; 21].

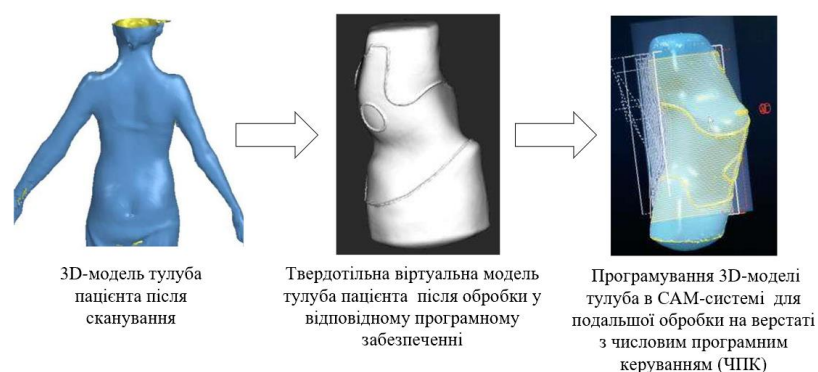


Рис. 5. Приклад цифрового технологічного ланцюга: 3D-модель анатомічної поверхні, твердотільна віртуальна модель, CAD/CAM-проекткування та виготовлення індивідуалізованого виробу [20]

З практичної точки зору, контроль якості з'єднання має бути багаторівневим. На першому рівні перевіряють геометричну точність деталей: лінійні розміри, співвісність, точність отворів, різьб, посадочних місць. На другому рівні оцінюють якість монтажу: чистоту контактних поверхонь, правильність складання, дотримання заданих моментів затягування, відсутність перекосу та стабільність положення вузла після навантаження. На третьому рівні здійснюють функціональний контроль у складі всієї системи – перевіряють положення сегментів, роботу шарнірів, відсутність паразитних переміщень, комфорт посадки та характер розподілу навантаження. Саме такий підхід впливає з сучасного розуміння протеза як інтегрованої біомеханічної системи, де технічні дефекти з'єднання швидко переходять у клінічні проблеми експлуатації [3; 4; 5; 9]. Нові підходи до моніторингу інтерфейсу «кукса – гільза» також демонструють, що технологічні похибки можуть бути виявлені не лише під час механічного контролю, а й через аналіз тиску, зсуву, температури чи мікрорухів у зоні контакту [5; 9].

Узагальнюючи сучасні підходи, можна стверджувати, що технологічні процеси з'єднання у біомеханічних системах протезування поступово переходять від ремісничо-складального підходу до керованого цифрового процесу, в якому точність задається ще на етапі проєктування, а якість вузла визначається не лише точністю механічного монтажу, а й повнотою цифрових даних, коректністю вибору матеріалів та параметрів виготовлення. Водночас цифровізація не скасовує традиційних інженерних вимог до з'єднань – жорсткості, втомної міцності, стабільності фіксації, контролю посадок і надійності роботи під змінним навантаженням. Саме поєднання цих двох підходів – класичної інженерної точності та сучасної цифрової індивідуалізації – нині визначає перспективи розвитку протезно-ортопедичних систем.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений огляд показав, що технологічні процеси з'єднання у біомеханічних системах протезування є одним із визначальних чинників функціональної ефективності, надійності та ергономічності протезно-ортопедичних конструкцій. Саме через з'єднувальні вузли реалізується силова та геометрична цілісність протеза, забезпечується передача навантаження між його компонентами, формується просторове положення окремих модулів і створюються умови для узгодження механіки виробу з біомеханікою рухів користувача. На відміну від звичайних машинобудівних систем, у протезуванні якість з'єднання впливає не лише на технічний ресурс вузла, а й на комфорт пацієнта, стабільність ходьби, розподіл тиску в зоні контакту з куксою та загальну безпечність експлуатації.

Узагальнення сучасних досліджень засвідчило, що найбільш поширеними технологічними проблемами у сфері з'єднання протезних систем є відхилення геометричних параметрів і посадок, порушення співвісності, нестабільність гвинтової або модульної фіксації, поява люфтів у шарнірних вузлах, а також накопичення похибок на етапах цифрового моделювання, виготовлення і складання. Навіть незначні дефекти з'єднання можуть спричинити зміщення осі навантаження, локальне перевантаження окремих ділянок приймальної гільзи, прискорене зношування деталей та погіршення функціональних характеристик протеза. Це дає підстави розглядати технологічні процеси з'єднання як критичний елемент усього циклу виготовлення біомеханічної системи, а не як допоміжну складальну операцію.

Огляд також підтвердив, що сучасний розвиток протезування пов'язаний із переходом до цифрових технологій, зокрема 3D-сканування, CAD/CAM-проєктування та адитивного виробництва, які істотно розширюють можливості індивідуалізації конструкцій і підвищення точності відтворення форми. Разом із тим цифровізація не усуває проблему точності з'єднання, а переносить її на новий рівень, де критичними стають якість цифрових даних, правильність побудови моделі, стабільність параметрів друку чи обробки та точність після обробки посадочних поверхонь.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язувати з кількома напрямками. Насамперед потребують поглиблення дослідження точності та довговічності модульних, різьбових і шарнірних з'єднань у протезах за умов реального циклічного навантаження. Важливим є також розроблення методів комплексного контролю якості з'єднувальних вузлів, які поєднували б геометричну оцінку деталей, перевірку складального стану та біомеханічний моніторинг інтерфейсу «кукса – гільза». Окремий інтерес становить дослідження можливостей використання адитивно виготовлених металевих і полімерних компонентів для формування індивідуалізованих з'єднань із прогнозованими механічними характеристиками. Усе це створює підґрунтя для подальшого вдосконалення протезно-ортопедичних систем і підвищення ефективності реабілітації пацієнтів.

Список використаної літератури:

1. Худецький І.Ю. Протезування та штучні органи / І.Ю. Худецький. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 184 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45797/1/Protezuвання_ta_shtuchni_orhany_KL.pdf.
2. Marin E. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review / E.Marin, A.Lanzutti // Materials. – 2023. – Vol. 17, № 1. DOI: 10.3390/ma17010114.
3. Advances in the measurement of prosthetic socket interface mechanics: a review of technology, techniques, and a 20-year update / P.R. Young, J.S. Hebert, K.Lindecrantz, L.M.N. Hermansson // Expert Review of Medical Devices. – 2023. – Vol. 20, № 9. – P. 729–739. DOI: 10.1080/17434440.2023.2244418.

4. Assessing Socket Fit Effects on Pressure and Shear at a Transtibial Residuum/Socket Interface / *K.M. Devin, J.Tang, D.Moser, L.Jiang* // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2023. – Vol. 2023. – 8 p. DOI: 10.1155/2023/3257059.
5. Monitoring the Residual Limb-Socket Interface: A Perspective on Clinical Needs and Challenges / *M.Liu, B.Evert, S.Kim and other* // *Biomedical Materials & Devices*. – 2025. DOI: 10.1007/s44174-025-00594-w.
6. Pousett B. Loading of prosthetic sockets during daily activities / *B.Pousett, S.Blumentritt, H.Stinus* // *Prosthetics and Orthotics International* [Electronic resource]. – Access mode : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>.
7. A scoping review of digital fabrication techniques applied to prosthetics and orthotics: Part 1 of 2–Prosthetics / *B.M. Oldfrey, D.Z. Morgado Ramirez, M.Miodownik and other* // *Prosthetics and Orthotics International*. – 2024. – Vol. 48, № 5. – P. 574–589. DOI: 10.1097/PXR.0000000000000351.
8. A Review on 3D Scanners Studies for Producing Customized Orthoses / *R.Silva, B.Silva, C.Fernandes and other* // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, № 5. DOI: 10.3390/s24051373.
9. 3D design – the integrated CAD CAM solution / Ottobock [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.ottobock.com/en-ex/services/iFab/iFab-solutions/3D-Design>.
10. 3D-printed orthoses and prostheses for people with physical disability in rehabilitation centers: a scoping review / *J.de Souza Pereira, A.S.M. Santos Xavier, R.da Silva Monteiro and other* // *BMC Musculoskeletal Disorders*. – 2024. – Vol. 25, № 1. DOI: 10.1186/s12891-024-07875-3.
11. The AERO prosthetic liner: socket pressure distribution, comfort and material composition / *Y.Miyata, K.Sasaki, G.Guerra and other* // *Annals of Medicine*. – 2024. – Vol. 56, № 1. DOI: 10.1080/07853890.2024.2380798.
12. Біомеханічні основи протезування та ортезування : навч. посіб. / *А.Д. Салєєва та ін.* – Х. : ХНУРЕ, 2022. – 352 с.
13. Конструювання та технології виготовлення ортезів на нижні кінцівки : навч. посіб. / *А.Д. Салєєва, В.В. Семенець, О.Г. Аврунін та ін.* – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 303 с.
14. What to know about prosthetic legs / Ottobock [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.ottobock.com/en-ex/prosthetics/lower-limb-prosthetics/prosthetic-legs>.
15. Tube adapters. Instructions for use / Ottobock [Electronic resource]. – Access mode : <https://spa-prod-commerce.cep.ottobock.com/medias/4957403.pdf>.
16. Hero Arm / Open Bionics [Electronic resource]. – Access mode : <https://openbionics.com/en/hero-arm/>.
17. The Current State of 3D-Printed Prostheses Clinical Outcomes: A Systematic Review / *H.Atallah, T.Qufabz, R.Naeem and other* // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2025. – Vol. 16, № 10. DOI: 10.3390/jfb16100370.
18. Powder Bed Fusion 3D Printing in Precision Manufacturing for Biomedical Applications: A Comprehensive Review / *R.J.N. Joshua, S.A. Raj, M.T. Hameed Sultan and other* // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 3. DOI: 10.3390/ma17030769.
19. Review of the Socket Design and Interface Pressure Measurement for Transtibial Prosthesis / *Gh.Pirouzi, N.A. Abu Osman, A.Eshraghi and other* // *The Scientific World Journal*. – 2014. – Vol. 2014. – 9 p. DOI: 10.1155/2014/849073.
20. Садовник А.Б. Моделювання ортезів на хребет при сколіозі і кіфозі та застосування 3D технологій для їх виготовлення : анотація кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 163 – Біомедична інженерія / *А.Б. Садовник*. – Харків, 2022. – 11 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://openarchive.nure.ua/items/c40ae79b-552c-44d5-9999-9d769ef83823>.
21. Ratto M. Prosthetist Knowledge and 3D Printing / *M.Ratto, D.Southwick* // *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*. – 2024. – Vol. 7, № 2. DOI: 10.33137/cpoj.v7i2.42175.

References:

1. Khudetskyi, I.Yu. (2021), *Protezuвання ta shtuchni orhany*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 184 p., [Online], available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45797/1/Protezuвання_ta_shtuchni_orhany_KL.pdf
2. Marin, E. and Lanzutti, A. (2023), «Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review», *Materials*, Vol. 17, No. 1, doi: 10.3390/ma17010114.
3. Young, P.R., Hebert, J.S., Lindecrantz, K. and Hermansson, L.M.N. (2023), «Advances in the measurement of prosthetic socket interface mechanics: a review of technology, techniques, and a 20-year update», *Expert Review of Medical Devices*, Vol. 20, No. 9, pp. 729–739, doi: 10.1080/17434440.2023.2244418.
4. Devin, K.M., Tang, J., Moser, D. and Jiang, L. (2023), «Assessing Socket Fit Effects on Pressure and Shear at a Transtibial Residuum/Socket Interface», *Applied Bionics and Biomechanics*, Vol. 2023, 8 p., doi: 10.1155/2023/3257059.
5. Liu, M., Evert, B., Kim, S. et al. (2025), «Monitoring the Residual Limb-Socket Interface: A Perspective on Clinical Needs and Challenges», *Biomedical Materials & Devices*, doi: 10.1007/s44174-025-00594-w.
6. Pousett, B., Blumentritt, S. and Stinus, H., «Loading of prosthetic sockets during daily activities», *Prosthetics and Orthotics International*, [Online], available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>
7. Oldfrey, B.M., Morgado Ramirez, D.Z., Miodownik, M. et al. (2024), «A scoping review of digital fabrication techniques applied to prosthetics and orthotics: Part 1 of 2–Prosthetics», *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 48, No. 5, pp. 574–589, doi: 10.1097/PXR.0000000000000351.
8. Silva, R., Silva, B., Fernandes, C. et al. (2024), «A Review on 3D Scanners Studies for Producing Customized Orthoses», *Sensors*, Vol. 24, No. 5, doi: 10.3390/s24051373.
9. Ottobock, «3D design – the integrated CAD CAM solution», [Online], available at: <https://www.ottobock.com/en-ex/services/iFab/iFab-solutions/3D-Design>
10. de Souza Pereira, J., Santos Xavier, A.S.M., da Silva Monteiro, R. et al. (2024), «3D-printed orthoses and prostheses for people with physical disability in rehabilitation centers: a scoping review», *BMC Musculoskeletal Disorders*, Vol. 25, No. 1, doi: 10.1186/s12891-024-07875-3.
11. Miyata, Y., Sasaki, K., Guerra, G. et al. (2024), «The AERO prosthetic liner: socket pressure distribution, comfort and material composition», *Annals of Medicine*, Vol. 56, No. 1, doi: 10.1080/07853890.2024.2380798.

12. Salieieva, A.D. et al. (2022), *Biomekhanichni osnovy protezuvannia ta ortezuvannia*, navch. posib., KhNURE, Kh., 352 p.
13. Salieieva, A.D., Semenets, V.V., Avrunin, O.H. et al. (2022), *Konstruiuvannia ta tekhnologii vyhotovlennia orteziv na nyzhni kintsivky*, navch. posib., KhNURE, Kharkiv, 303 p.
14. Ottobock, «What to know about prosthetic legs», [Online], available at: <https://www.ottobock.com/en-ex/prosthetics/lower-limb-prosthetics/prosthetic-legs>
15. Ottobock, «Tube adapters. Instructions for use», [Online], available at: <https://spa-prod-commerce.ccp.ottobock.com/medias/4957403.pdf>
16. Open Bionics, «Hero Arm», [Online], available at: <https://openbionics.com/en/hero-arm/>
17. Atallah, H., Qufabz, T., Naeem, R. et al. (2025), «The Current State of 3D-Printed Prostheses Clinical Outcomes: A Systematic Review», *Journal of Functional Biomaterials*, Vol. 16, No. 10, doi: 10.3390/jfb16100370.
18. Joshua, R.J.N., Raj, S.A., Hameed Sultan, M.T. et al. (2024), «Powder Bed Fusion 3D Printing in Precision Manufacturing for Biomedical Applications: A Comprehensive Review», *Materials*, Vol. 17, No. 3, doi: 10.3390/ma17030769.
19. Pirouzi, Gh., Abu Osman, N.A., Eshraghi, A. et al. (2014), «Review of the Socket Design and Interface Pressure Measurement for Transtibial Prosthesis», *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, 9 p., doi: 10.1155/2014/849073.
20. Sadovnik, A.B. (2022), «Modeliuvannia orteziv na khrebet pry skoliozi i kifozi ta zastosuvannia 3D tekhnologii dlia yikh vyhotovlennia», anotatsiia kvalifikatsiinoi roboty zdobuvacha vyshchoi osvity na druhomu (mahisterskomu) rivni, spetsialnist 163 – Biomedychna inzheneriia, Kharkiv, 11 p., [Online], available at: <https://openarchive.nure.ua/items/c40ae79b-552c-44d5-9999-9d769ef83823>
21. Ratto, M. and Southwick, D. (2024), «Prosthetist Knowledge and 3D Printing», *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, Vol. 7, No. 2, doi: 10.33137/cpoj.v7i2.42175.

Парненко Валерія Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-1450-2744>.

Наукові інтереси:

- дизайн для виготовлення та складання продукту, технічний дизайн;
- біомедична інженерія та протезно-ортопедичні системи.

Parnenko V.S.

Current problems and research directions of technological joining processes in modern biomechanical prosthetic systems

The article considers technological joining processes in biomechanical prosthetic systems as one of the key factors determining the functionality, reliability, ergonomics, and durability of prosthetic and orthotic structures. The relevance of the topic is обусловлена? translate properly: due to direct influence. The relevance of the topic is due to the fact that the quality of joining units directly affects the accuracy of spatial positioning of prosthetic components, load transfer, user comfort, and operational safety of the product. The purpose of the article is to generalize current approaches to the implementation of technological joining processes in biomechanical prosthetic systems, to identify the main technological problems arising during the manufacture and assembly of joining units, and to assess the effect of the accuracy of such joints on the performance characteristics of prostheses. The study is review-based and relies on the analysis of Ukrainian and foreign scientific publications, educational editions, technical documentation, and current applied developments in the fields of prosthetics, biomechanics, computer-aided design and computer-aided manufacturing (CAD/CAM), 3D scanning, and additive manufacturing. The article analyzes the main types of joints used in prostheses, including rigid modular, threaded, hinged, and combined units, and also considers typical problems associated with misalignment, fit deviations, fixation instability, backlash occurrence, digital modeling errors, and defects in 3D-printed elements. It has been established that even minor inaccuracies in joining can cause a shift in the load axis, deterioration in pressure distribution within the «residuum – socket – prosthesis» system, reduced gait stability, accelerated wear of components, and patient discomfort. It is shown that modern digital technologies expand the possibilities for prosthesis customization and improve manufacturing accuracy; however, they also impose stricter requirements on the control of geometry, materials, printing parameters, and post-processing. It is concluded that technological joining processes should be regarded as a critical element in the manufacture of biomechanical prosthetic systems, affecting not only the structural integrity of the product but also its clinical effectiveness, while prospects for further research are associated with improving methods for controlling the accuracy, durability, and digital design of joining units.

Keywords: biomechanical prosthetic systems; technological joining processes; prosthetic and orthotic structures; joining units; assembly accuracy; CAD/CAM; 3D scanning; additive manufacturing; biocompatible materials; prosthesis ergonomics.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2025.