

Сучасні аспекти застосування комп'ютер-асистованих апаратів зовнішньої фіксації (Огляд літератури)

Суворов В.Л.¹✉, Євлантьєва Т.А.¹, Кулик Ю.А.¹, Козік Є.В.¹, Ларкевич О.Г.¹, Дем'ян Ю.Ю.¹

Резюме. Застосування комп'ютер-асистованих апаратів зовнішньої фіксації (КААЗФ) є ефективним і малоінвазивним методом для корекції багатоплощинних деформацій та дефектів кісток у дітей і дорослих. Вони дозволяють досягти кращого ступеня корекції порівняно з класичним апаратом Ілізарова, забезпечуючи меншу кількість ускладнень. Серед найефективніших КААЗФ виділяють просторову рамку братів Taylor (TSF) та Orthex Hexapod System. Окрім того, високу точність корекції з мінімізацією похибок демонструє роботизована система «Auto Strut». Основні ускладнення при використанні КААЗФ — поверхневі інфекції, тимчасові контрактури суглобів та сповільнена консолидація, які зазвичай лікуються консервативно.

Ключові слова: комп'ютер-асистовані апарати зовнішньої фіксації, деформація кінцівки.

Вступ

Добре відомо, що ряд вроджених, посттравматичних або дегенеративних патологічних станів можуть призвести до таких наслідків, як деформації довгих кісток кінцівок, контрактури суглобів та критичні кісткові дефекти (всі вони візуально проявляються деформаціями кінцівок). Відсутність своєчасного та ефективного лікування вищезгаданих наслідків може призвести до значного погіршення якості життя пацієнтів, обмеження рухливості, больового синдрому та розвитку вторинних патологічних змін у суглобах. Також виникає ціла низка проблем під час хірургічної корекції деформацій кінцівок, до яких відносять: ризик відторгнення трансплантату, інфекційні ускладнення та довготривалий період реабілітації. Таким чином, хірургічна корекція деформацій довгих кісток кінцівок, контрактур суглобів та лікування критичних кісткових дефектів досі залишається складним завданням. У зв'язку з цим впровадження сучасних методів корекції деформацій із застосуванням комп'ютер-асистованих апаратів зовнішньої фіксації (КААЗФ) сталореволюційним підходом у цій галузі.

На сьогодні, КААЗФ є одними із найефективніших методів лікування деформацій кінцівок. Їх перевагами є: стабільна фіксація кісткових фрагментів, поступова корекція деформації та керований

дистракційний остеогенез. Серед найбільш поширених систем КААЗФ виділяють просторову рамку братів Taylor (TSF), однак широкого вжитку набувають на сьогодні й інші КААЗФ типу «Orthex» та «Maxframe». Використання комп'ютерних технологій під час корекції деформацій кінцівок значно підвищує точність корекції, дозволяє персоналізувати лікування та забезпечити кращі результати.

Мета огляду літератури: 1) узагальнення сучасних підходів до лікування деформацій кінцівок за допомогою КААЗФ; 2) розглядання переваг та недоліків застосування різних типів КААЗФ; 3) оцінка ефективності КААЗФ у лікуванні складних деформацій кінцівок; 4) порівняльний аналіз ефективності різних типів КААЗФ; 5) аналіз ускладнень та прогнозування результатів лікування за допомогою різних типів КААЗФ; 6) визначення місця КААЗФ у лікуванні наслідків бойової травми.

Критерії відбору публікацій для огляду літератури.

Для проведення огляду літератури були відібрані наукові статті, що висвітлюють сучасні методи корекції деформацій кінцівок із використанням КААЗФ. Основними критеріями відбору публікацій були наступні: публікація у фаховому індексованому журналі, доступність повного тексту публікації, актуальність (не старше 10 років), опис клінічних результатів лікування, аналіз ефективності застосування КААЗФ, опис переваг та недоліків у різних клінічних випадках та наявність порівняльного аналізу застосування різних типів КААЗФ один з одним та з класично описаним апаратом

✉ Суворов В.Л., vasil_suvorov@ukr.net

¹ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Україна, Київ

Ілізарова. Джерела інформації були відібрані з наукометричних баз даних, таких як PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar.

Загальний огляд КААЗФ типу «гексапод»

КААЗФ типу «гексапод» з 2004 року стали революційним інструментом у сучасній ортопедії, особливо при корекції складних деформацій кінцівок. Вони відрізняються високою точністю, можливістю одночасної корекції в різних площинах та міні-інвазивністю [1-6]. Найвідомішим представником цього класу пристроїв є просторова рамка братів Taylor (TSF), яка широко використовується для лікування деформацій кісток та суглобів, сповільненої консолидації кісток та подовження сегментів кінцівок [7-13].



Рис. 1. КААЗФ типу «Taylor Spatial Frame – TSF»
(джерело – <https://uat-cd.smith-nephew.com/>).

Принцип роботи КААЗФ базується на принципі паралельної кінематики, що дозволяє здійснювати точну корекцію деформацій за допомогою шести регульованих стрижнів; кожен із шести стрижнів фіксатора може регулюватися незалежно, що забезпечує високу точність корекції (рис.1). Така конструкція надає можливість корекції складних, багатоплощинних деформацій кінцівок з урахуванням усіх шести ступенів свободи (переміщення та обертання в трьох площинах – фронтальній, сагітальній та аксіальній) [10]. Особливість цієї будови металофіксатора дозволяє ортопеду точно

розраховувати параметри корекції за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що зменшує ризик помилок [14, 15].

Аналогічно з іншими апаратами зовнішньої фіксації (АЗФ), використання КААЗФ вимагає етапного лікування із дотриманням певних кроків для досягнення корекції деформації. До цих етапів відносять: 1) планування з використанням програмного забезпечення для розрахунку параметрів корекції; 2) монтаж КААЗФ з попередньо запланованим розміщенням кілець/напівкілець фіксатора на сегментах кістки з урахуванням анатомічних особливостей; 3) поступова корекція деформації з регулюванням довжини кожного зі стрижнів фіксатора згідно з планом, який було отримано в ході післяопераційного планування корекції деформації; 4) витримування періоду стабілізації після досягнення запланованої корекції для забезпечення стабільного зрощення сегментів кістки [10-17].

Однак, у порівнянні з традиційними АЗФ (такими як апарат Ілізарова) КААЗФ мають ряд переваг при корекції деформацій. У експериментальному дослідженні Fenton C et al. (2021 р.) порівнювались характеристики жорсткості двох систем КААЗФ (TrueLok-Hex (TL-HEX) та Taylor spatial frame (TSF) із традиційним апаратом системи Ілізарова [19]. Автори дійшли висновку, що обидві системи КААЗФ мали меншу жорсткість при осьовому навантаженні (407,9 та 366,2 Н/мм відповідно проти 514,6 Н/мм), однак, більшу жорсткість під час згинання (63,3 та 68,6 Н/мм відповідно проти 62,7 Н/мм) та скручування (27,8 та 31,8 Н/мм відповідно проти 10,2 Н/мм). Також, є ряд робіт присвячених порівнянню клініко-рентгенологічних результатів після застосування КААЗФ та апарату Ілізарова. Так, в роботі Reitenbach E, et al. (2016 р.) [18] при порівнянні КААЗФ та апарату Ілізарова для корекції деформацій та подовження сегментів нижньої кінцівки було виявлено меншу кількість проблем під час застосування КААЗФ (12,1% проти 50%), меншу кількість інфекційних ускладнень (9,1% проти 40%) та кращу якість досягнення запланованого рівня корекції (0% відхилень від запланованого результату в групі КААЗФ проти 36,8% в групі порівняння). Проте, автори також зазначили, що всі вищезгадані проблеми та ускладнення суттєво не позначились на остаточному клінічному результаті ($p > 0,05$ за даними порівняння функціональних шкал). Аналогічно, у своєму дослідженні Manggala et al. (2018 р.) порівнювали ефективність АЗФ типу Ilizarov та TSF для корекції деформацій стопи та гомілкостопного суглоба. Автори зробили висновок, що TSF забезпечують більшу точність корекції ($p = 0,033$), кращі післяопераційні результати (за даними шкал

VAS-FA, $p=0,01$ та SF-36, $p=0,018$) і мають тенденцію до меншої кількості ускладнень, хоча і не статистично достовірно (28,6% в групі КААЗФ проти 71,4% в групі порівняння при $p=0,286$) [36]. Також, системи КААЗФ мають ряд переваг над апаратами Ілізарова при лікуванні значних кісткових дефектів. Так, у дослідженні Sheridan GA et al. (2023 р.) автори порівнювали КААЗФ та апарати Ілізарова для закриття кісткових дефектів [37]; було зроблено висновок, що КААЗФ мають безперечну перевагу перед апаратами Ілізарова з точки зору часу досягнення консолідації (253 дні проти 449; $p = 0,0001$) та рентгенологічних показників (індекс консолідації складав 59,1 днів/см в групі КААЗФ проти 87,5 днів/см при $p = 0,0001$; індекс АЗФ складав в групі КААЗФ 72,3 днів/см проти 96,1 днів/см при $p = 0,0009$). Аналогічно, у дослідженні Shi, B. et al. (2024 р.) [7] при порівнянні КААЗФ та апарату Ілізарова для виконання «кісткового транспорту» було доведено, що застосування КААЗФ скорочує тривалість хірургічного втручання ($93,8 \pm 7,3$ хв проти $109,8 \pm 1,4$ хв, $p < 0,05$), забезпечує кращий рівень корекції деформації (показники кутів МРТА та РРТА у група КААЗФ складали $88,1 \pm 12,1$ та $80,9 \pm 1,3$ градусів, відповідно проти $84,4 \pm 2,4$ та $76,2 \pm 1,9$ градусів в групі порівняння, $p < 0,05$) та дає меншу кількість ускладнень (50% в групі КААЗФ проти 75% в групі порівняння). Хоча варто зазначити, що віддаленні клінічні результати за шкалою ASAMI суттєво не різнились ($p > 0,05$).

Основною перевагою КААЗФ є їх універсальність, що дозволяє використовувати їх для лікування широкого спектру патологій. Крім того, застосування комп'ютерних розрахунків дозволяє здійснювати додаткову корекцію деформації в процесі лікування без додаткових оперативних втручань, що зменшує ризик ускладнень [1, 10]. Проте, КААЗФ типу «гексапод» мають і певні недоліки. Основним з них є висока вартість та складність у використанні, що обмежує можливість їх застосування в певних регіонах; окрім того, необхідна висока кваліфікація ортопеда у застосуванні АЗФ для коректного налаштування параметрів пристрою та запланованої корекції у спеціальному додатку [1]. Для усунення людського фактору та підвищення якості корекції деформації в 2021 році Gigi et al. було запропоновано новітній підхід до використання КААЗФ та описано роботизовану систему «Auto Strut», яка автоматично регулює положення стрижнів фіксатора без втручання пацієнта [6]. Автори підкреслили високу точність корекції; корекція деформації відмічалась у 100%, а відхилення зміщення фрагментів від запланованого рівня корекції склало до 1 мм в 94% випадків.

Також, для збільшення точності корекції деформації було ініційовано застосування технології 3D. Так, Burton NJ et al. в 2024 році запропонував застосування персоналізованих шаблонів для остеотомії на передопераційному етапі планування [3].

Основними показання до використання КААЗФ є:

- Вроджені вади розвитку та деформації у дітей та дорослих (такі як ахондроплазія або хвороба Блаунта, клишоногість, наслідки вітамін Д-залежного рахіту, гіпоплазії або аплазії кісток нижньої кінцівки та інші) [4, 6, 9, 17, 18, 22, 23, 27, 29, 32, 38];
- Корекція посттравматичних деформацій та для закриття кісткових дефектів (хибний суглоб або сповільнена консолідація, вторинні деформації та дефекти довгих кісток кінцівок) [2, 7, 8, 12, 14, 15, 29, 30, 31, 34, 38];
- Лікування деформацій стопи у дітей та дорослих [16, 35, 36];
- Наслідки інфекційних процесів (кісткові дефекти після дебрідменту інфекційного вогнища, вторинні деформації кісток) [20, 23, 26];
- Гостре вкорочення сегментів кісток для первинного закриття дефектів м'яких тканин із подальшою поступовою дистракцією та корекцією деформацій [5, 24, 37];
- Лікування переломів великогомілкової кістки [25, 28].

Однак, не було знайдено публікацій із застосуванням КААЗФ для корекції посттравматичних деформацій та дефектів довгих кісток кінцівок у пацієнтів внаслідок бойової травми. Враховуючи значну кількість постраждалих військових та цивільних внаслідок вторгнення РФ на територію України, КААЗФ мають широке поле до застосування. Дослідження особливостей впливу саме бойової травми на застосування вищезгаданих апаратів є актуальним та затребуваним станом на даний час.

Результати застосування КААЗФ типу «гексапод» в педіатричній практиці

Застосування КААЗФ у дітей є важливим напрямком сучасної ортопедії, оскільки дозволяє малоінвазивно та точно корегувати переважну більшість вроджених та набутих деформацій кінцівок. Такі захворювання, як ахондроплазія, хвороба Блаунта, вітамін Д-залежний та резистентний рахіт, аплазія/гіпоплазія кісток нижньої кінцівки є найпоширенішими показаннями до використання КААЗФ в педіатричній практиці [4, 6, 9, 18, 22, 27, 29]. У своїй статті Horn et al. (2017 р.) описують використання TSF для корекції деформацій та подовження кінцівок у дітей із вродженими вадами розвитку та підкреслюють високу точність

досягнутої корекції та відмінні подальші клінічні результати [27]. Аналогічно, у дослідженні Mare et al. (2022 р.) було показано досягнення стабільного виправлення деформації при хворобі Блаунта у дітей без серйозних ускладнень [22]. Також КААЗФ широко застосовуються для ізольованого подовження кісток або симультанного подовження кісток із корекцією деформацій (як у випадку аплазії/гіпоплазії стегнової, малогомілкової та великогомілкової кісток) [29].

Посттравматичні деформації у дітей (аналогічно з дорослими пацієнтами) потребують хірургічної корекції, яку можна досягти із застосуванням КААЗФ. У своїй статті Liu et al. (2021 р.) описує використання КААЗФ типу «гексапод» для корекції посттравматичних деформацій гомілки у дітей з досягненням добрих та стабільних результатів навіть у складних випадках [28]. Аналогічно, у дослідженні Galal (2024 р.) було встановлено високу ефективність використання КААЗФ типу «гексапод» для лікування посттравматичних деформацій у дітей з вродженими вадами розвитку, які вже мали попередні хірургічні втручання [30].

Незважаючи на високу ефективність застосування КААФЗ у дітей, їх використання супроводжується певними ускладненнями. Найпоширенішим

ускладненням є поверхневий інфекційний процес в місцях введення шпиль або стрижнів, що вимагає консервативного лікування (антибіотикотерапія та локальна гігієна) [9, 22, 27]. У своїй статті Horn et al. (2017 р) показали, що частота ускладнень при лікуванні різних вроджених та набутих деформацій кінцівок у дітей може перевищувати 100% (декілька ускладнень можуть бути наявними у одного пацієнта), однак, переважна більшість цих ускладнень є тимчасовими та піддаються консервативному лікуванню; менше 5% пацієнтів потребували подальших хірургічних втручань [27]. Незважаючи на вищезгадану частоту ускладнень, довгострокові клініко-рентгенологічні результати у переважної більшості пацієнтів (85-98%) є відмінними або добрими; в довгостроковій перспективі ці діти мають високу якість життя та відсутність рецидивів деформацій [27, 29]. Більш того, у дослідженні Messner et al. (2021 р.) було доведено, що коректне передопераційне планування корекції та ретельний післяопераційний догляд за фіксатором значно знижують ризик виникнення ускладнень [9].

Основні види патології у дітей, при яких застосовуються КААЗФ типу «гексапод» та результати їх лікування представлено в таблиці 1.

Таблиця №1

Результати застосування КААЗФ типу «гексапод» в педіатричній практиці

Цит:	Тип КААЗФ	Показання	N вип.	Результати	Ускладнення/проблеми
[4]	Smart Correction Frame (SCF)	Гіпоплазія/аплазія кісток гомілки, хвороба Блаунта, множинна епіфізарна дисплазія, ахондроплазія, вроджений хибний суглоб великогомілкової кістки, хвороба Ollier та інші BVP* нижньої кінцівки	54	Корекція досягнута одним налаштуванням ПЗ – 89%, подальша корекція ПЗ – 11%. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Точність корекції різниці довжини = 96,3%; різниці довжини та деформації = 95,7% та 85,1% відповідно; одноплосинної деформації = 85,2%; багатоплосинної деформації = 80,2%.	Поверхнева інфекція – 14,8%; глибока інфекція – 3,7%; незрощення – 3,7%; перелом регенерату – 3,7%; еквінуса деформація стопи – 1,9%
[6]	Auto Strut System	Ідіопатична варусна деформація, гемігіпертрофія, гіпо/аплазія кісток гомілки, хвороба Блаунта, хвороба Ollier, ахондроплазія	10	РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Тривалість дистракції – 49,8 днів. Індекс дистракції – 12,2 дні/см.. Тривалість консолидації – 104 дні. Індекс консолидації – 38 днів/см. Похибка дистракції (в мм.): 1 мм – 94%; 2-3 мм – 6%.	
[9]	TSF	Аплазія/гіпоплазія малогомілкової кістки, посттравматичні деформації, наслідки септичного артрити, гемігіпертрофія, хвороба Блаунта, рекурвація колінного суглобу, задньомедіальна деформація великогомілкової кістки	18	Корекція досягнута одним налаштуванням ПЗ – 25%, подальша корекція ПЗ – 75%. Тривалість лікування – 230 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ – 41 день/см. Відхилення МРТА* від запланованого = 2,3°; відхилення РРТА* від запланованого = 0,6°	Поверхнева інфекція – 40%;

[9]	Orthex Hexapod System	Аплазія/гіпоплазія малогомілкової кістки, ахондроплазія, наслідки поліомієліту, хвороба Блаунта, синдроми Leri-Weil та Turner, мукополісахаридоз	25	Корекція досягнута одним налаштуванням ПЗ – 86,4%, подальша корекція ПЗ – 13,6%. Тривалість лікування – 203 дні. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ – 43 дні/см. Відхилення МРТА* від запланованого = 0,1°; відхилення РРТА* від запланованого = 1,6°	Поверхнева інфекція – 18%;
[18]	TSF	Багатопощинні деформації нижніх кінцівок при вродженій та набутій патології.	33	Тривалість лікування – 192,1 день. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Період дистракції – 68,7 дні. Індекс дистракції – 11,6 дні/см. Індекс консолідації – 11,7 дні/см. Корекція досягнута – 78,8%. LLD* перед операцією – 53,7 мм, у віддалений період – 15,3 мм. КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ TKS* – 85,4/100 бб. KFS* – 80,4/100 бб. SF-36* – 43,15 бб.	Поверхнева інфекція – 9%; втрата корекції деформації – 0%
[22]	TSF	Інфантильна та адолесцентна форма хвороби Блаунта	25	Тривалість лікування – 136 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Період корекції – 16 днів. МРТА* до операції – 59°, після корекції – 86°, ступінь корекції – 27° -РРТА* до операції – 64°, після корекції – 79°, ступінь корекції – 13° -внутрішня ротація – 15°, після корекції – норма (0–15° зовнішньої ротації) -ТГА* до операції – +28° (varus), після корекції – -1.8° (valgus), ступінь корекції – 29.8° Ступінь корекції: добра - 55%, задовільна - 35%, незадовільна - 10%	Поверхнева інфекція – 100%; рецидив деформації – 8%, похибка налаштування ПЗ – 4%, сповільнена консолідація – 4%
[27]	TSF	Вроджені (Група 1) та набуті деформації нижніх кінцівок (Група 2): аплазія/гіпоплазія кісток нижньої кінцівки, прояви рахіту, скелетні дисплазії; наслідки інфекційного або травматичного пошкодження зони росту	213	Корекція досягнута одним налаштуванням ПЗ – 88,3%, подальша корекція ПЗ – 11,7% Тривалість лікування: -228 днів (Група 1) -186 днів (Група 2) РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс дистракції : -66 днів/см (Група 1) та -60 днів/см (Група 2) Корекція досягнута – 93,5% Резидуальна деформація (2-5°): 5,6%. Резидуальна різниця довжини ніг ≥ 1 см: 0,9%.	Тимчасова поверхнева інфекція – майже всі (*цифр не надано), сповільнена консолідація – 4,2%, перелом регенерату – 3,7%, остеомієліт – 0,5%, компартмент-синдром – 0,9%, нейропатія – 0,5%, підзвих суглобу – 0,5%
[29]	TSF	Посттравматичні деформації (Група 1), хвороба Блаунта (Група 2), наслідки рахіту (Група 3), інші деформації нижньої кінцівки (Група 4)	55	Тривалість лікування: -127,5 дні (Група 1) -108,2 дні (Група 2) -125,8 дні (Група 3) -162,2 дні (Група 4) РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Корекція досягнута: -Група 1 - 100% -Група 2 – 100% -Група 3 - 100% -Група 4 – 92,3%	Поверхнева інфекція – 36,4%, сповільнена консолідація – 5,4%, перелом регенерату – 3,6%, деформація регенерату – 1,8%, Підзвих суглобу – 1,8%, хронічний остеомієліт – 1,8%

*BBP (вроджені вади розвитку); МРТА (medial proximal tibial angle – медіальний проксимальний кут великогомілкової кістки), РРТА (posterior proximal tibial angle – задній проксимальний кут

великогомілкової кістки), TKS (Total Knee Score – загальний бал колінного суглоба), KFS (Knee Function Score – функціональний бал колінного суглоба), TAS (Tegner Activity Score – рівень

активності за Тегнером), SF-36 (Short Form Survey Instrument – опитувальник загального стану здоров'я), TFA (tibia-femoral angle – стегно-великогомілковий кут).

Застосування КААЗФ у дорослих пацієнтів

КААЗФ також широко використовуються для лікування складних деформацій та дефектів кісток у дорослих. Деформації гомілки (в тому числі посттравматичні) є одними з найпоширеніших показань до використання КААЗФ у дорослих. Висока ефективність застосування КААЗФ описана в роботі Liu et al. (2021 р.), де було показано, що дані апарати дозволяють коригувати багатоплощинні деформації гомілки з похибкою корекції до 2-3 мм та 1-2 градуси [28].

Дефекти кісток, що виникають внаслідок лікування інфекційних процесів, резекції пухлин або важких травм, часто потребують застосування методів дистракційного остеогенезу. У дослідженні Nariyan S.V. та співавт. [5] проаналізовано результати лікування 39 пацієнтів із сегментарними кістковими дефектами, отриманими внаслідок бойових травм, за допомогою дистракційного остеогенезу. Застосування різних технік кісткового транспорту, включаючи використання кільцевих апаратів зовнішньої фіксації та інтрамедулярних стрижнів, дозволило досягти позитивних клінічних результатів та зменшити час перебування пацієнтів у фіксаційних пристроях. Це підкреслює ефективність дистракційного остеогенезу в лікуванні складних кісткових дефектів, особливо в умовах бойових травм.

Іншим показанням для застосування КААЗФ

є набуті деформації стопи (такі як артропатія Шарко або еквінусна деформація стопи). У статті Lahoti et al. [16] описує використання TSF для корекції деформацій стопи при артропатії Шарко та повідомляє про 90% ефективність даної технології. Аналогічно, у дослідженні Dabash et al. [35] було продемонстровано високу ефективність TSF у лікуванні еквінусної деформації стопи.

Ще одним малопоширеним, однак важливим показанням до застосування КААЗФ є гіпертрофічний хибний суглоб; в своїй роботі Ferreira et al. [11] описують техніку лікування гіпертрофічного хибного суглобу великогомілкової кістки з використанням TSF, де авторам вдалось скоригувати деформацію та досягти зрощення сегментів кістки за допомогою поступової дистракції.

Однак, аналогічно і з педіатричною практикою, застосування КААЗФ у дорослих супроводжується певними ускладненнями. Найпоширенішими ускладненнями є інфекційні процеси в місцях введення шпиль/стрижнів, тимчасові контрактури суглобів та сповільнена консолидація.

Проте, незважаючи на описані недоліки, загалом довгострокові результати після застосування КААЗФ у дорослих є відмінними або добрими (93-100% випадків). Так, пацієнти досягають повного відновлення функції кінцівки та задовільного косметичного результату [2, 5, 7, 20], мають високу якість життя (88,6%) та відсутність рецидивів у подальшому [15, 24, 35].

Основні види патології у дорослих пацієнтів, при яких застосовуються КААЗФ та результати їх лікування представлено в таблиці 2.

Таблиця №2

Результати застосування КААЗФ у дорослих

Цит:	Тип КААЗФ	Показання	N вип.	Результати	Ускладнення
[2]	Ortho-SUV	Посттравматичні навколосуглобові деформації сегментів нижньої кінцівки	27	Корекцію досягнуто одним налаштуванням ПЗ в 58,3%, подальша корекція ПЗ в 41,7%. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Термін досягнення корекції – 14,9 дні. Досягнуто корекцію – 92,7% Передопераційний DSS* = 18,7, післяопераційний DSS* = 1,5 КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Ефективність: -відмінна – 92,6% -добра – 3,7% -задовільна – 0% -незадовільна – 3,7%	Не досягнуто запланованої корекції – 7,3%
[5]	Ortho-SUV	Сегментарні дефекти кісток, що виникли внаслідок бойових травм (вогнепальні, мінно-вибухові); наявність інфекційного процесу	39	Перебування в АЗФ – 309 днів РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Період корекції деформації – 13,2 днів Період дистракції – 59,6 дні Індекс АЗФ – 96,8 днів/см Консолидація досягнута – 100%	Поверхнева інфекція – 43,6%; контрактури суглобів – 20,5%; затримка зрощення в зоні докінгу – 10,3%; глибока інфекція – 5,1%.

		(остеомиєліт), коли неможливо використати внутрішню фіксацію; м'якотканинні дефекти, які потребують контрольованого управління положенням уламків; необхідність дистракційного остеогенезу (зокрема, кістковий транспорт).		Корекція досягнута – 872% Рентгенологічний результат за ASAMI*: відмінний – 84,6% добрий – 15,4% КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Функціональний результат за ASAMI*: відмінний – 51,3% гарний – 28,2% задовільний – 17,9% незадовільний – 2,6% Функціональний результат за LEFS*: 66,4% одразу після зняття АЗФ 85,9% через 6 місяців 90,8% через 12 місяців	
[7]	TSF	Техніка «кістковий транспорт» для закриття дефектів >3 см. (посттравматичних та після інфекційних ускладнень)	30	Тривалість лікування – 291 день. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ – 1,4 міс/см. МРТА* = 88,1°, РРТА* = 80,9°. Рентгенологічний результат за ASAMI*: -відмінний – 80% -добрий – 20% КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Функціональний результат за ASAMI*: -відмінний – 70% -добрий – 23,3% -задовільний – 6,7% -незадовільний – 0%	Поверхнева інфекція – 30%; тимчасова контрактура суглобу – 10%; сповільнена консолидація – 6,7%; перелом регенерату – 3,3%.
[12]	Q Spatial Fixator (QSF)	Вальгусна варусна деформація колінного суглобу з різницею довжини ніг; КААЗФ на гомілку у комбінації з коригувальною остеотомією стегнової кістки та МОС пластиною	25	Тривалість лікування – 112,8 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Різниця довжини ніг – 0,32 см. Корекція НКА* = 13,33°, НКА* у віддалений період = 1,95°. Корекція MAD* = 45,68 мм.; MAD* у віддалений період = 5,59 мм. Корекція МРТА* = 14,1°, МРТА* у віддалений період = 87,38°. КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ AKSS-O* до операції – 71,15; у віддалений період – 94,81. AKSS-F* до операції – 62,92; у віддалений період – 90,27. Шкала активності Tegner до операції – 2,81; у віддалений період – 6,19.	Глибока інфекція – 0%; сповільнена консолидація – 0%;
[14]	TSF	Варусна, вальгусна деформація колінного суглобу, вкорочення кінцівки (групи А, В, С, відповідно).	23	Тривалість лікування: -група А – 323,4 дні -група В – 244,2 дні -група С – 208,2 дні РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ: -група А = 84,7 дні/см -група В = 60,5 дні/см -група С = 51,2 дні/см	-
[15]	TSF	Багатоплощинні деформації нижніх кінцівок внаслідок травми, множинної епіфізарної дисплазії, ахондроплазії, фіброзної дисплазії, рахіта, спондило-епіфізарної дисплазії, хвороби Педжета	70	РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Вальгусна деформація: -MAD* до операції – 27,2 мм., після корекції – 4 мм., ступінь корекції = 23,2 мм. -LDFA* до операції – 80,2°, після операції – 86,8°, ступінь корекції = 6,6°. -МРТА* до операції – 96,8°, після операції – 89,4°, ступінь корекції = 7,4°. -LDTA* до операції – 76°, після операції –	Сповільнена консолидація – 7,1%, стійка контрактура суглобу – 1,4%, м'язова грижа – 1,4%, легенева емболія – 1,4%. компартмент-синдром – 1,4%, перелом регенерату – 1,4%, псевдоаневризма

				86°, ступінь корекції = 10°. Варусна деформація: -MAD* до операції – 38,8 мм після корекції – 7,4 мм, ступінь корекції = 31,4 мм. -LDFA* до операції – 99,8°, після операції – 92,2°, ступінь корекції = 7,6°. -MPTA* до операції – 81,7°, після операції – 87°, ступінь корекції = 6,3°. -LDTA* до операції – 110,5°, після операції – 90,6°, ступінь корекції = 19,9°. КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Функціональні результати: PROMS* = 6,2 з 7 (88,6%)	артерії – 1,4%, серома – 1,4, транзиторна нейропатія – 1,4%, поверхнева інфекція – 1,4%
[16]	TSF	Деформації стопи внаслідок артропатії Charcot	10	Тривалість лікування – 114 днів; РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Термін досягнення корекції – 28 днів. -кут Meary's AP та LAT* = 25° та 18° до операції та 10° і 8° відповідно, після корекції. -консолідація місця остеотомії – 100%. КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -рухома стопа, що не потребує спеціального взуття без виразок та подальших інфекційних ускладнень – 90% (9/10 пацієнтів)	Поверхнева інфекція – 80%, перелом шпичі – 20%
[17]	Qiao Spatial Frame (QSF)	Хвороба Блаунта, наслідки рахіту, посттравматичні деформації.	28	Тривалість лікування – 123,2 дні. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Термін досягнення корекції – 21,4 дні. -MAD* до операції – 54,1 мм, віддалений результат – 8,2 мм. -mFTA* до операції – 167,7°, віддалений результат – 177,6° -LDFA* до операції – 83,7°, віддалений результат – 87,8° -MPTA* до операції – 75,2°, віддалений результат – 87,6° -LLD до операції – 13,8 мм., віддалений результат – 7,6 мм. КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -LEFS* до операції – 51,6 бб., віддалений результат – 72,3 бб. -KSS* до операції – 68,5 бб., віддалений результат – 92,9 бб. -функціональна шкала до операції – 67,8 бб., віддалений результат – 94,2 бб. (94,2%)	Сповільнена консолидація – 0%, Транзиторна нейропатія – 0%, поверхнева інфекція – 0%, глибока інфекція -0%
[20]	TSF	Масивні дефекти кісток та м'яких тканин, що виникли внаслідок дебрідменту інфекційного незрошення	3	Тривалість лікування – 186 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ – 29,7 днів/см. Віддалений рентгенологічний результат за критеріями Palley: -відмінний – 100% КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ за критеріями Palley: -відмінний – 66,7% -добрий – 33,3%	-
[23]	TSF	Остеомієліт, вроджений псевдоартроз великогомілкової кістки; деформація регенерату після закриття кісткового дефекту	4	Тривалість лікування – 387 дні. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -LLD* до операції – 9,0 см., віддалений період – 0,6 см., корекція = 8,4 см. -НКА* до операції – 8,4°, віддалений період – 0,9°	Поверхнева інфекція – 75%, частковий некроз шкіри – 25%, тимчасова контрактура суглобу – 25%, стійка контрактура суглобу

		вільним трансплантатом малогомілкової кістки		корекція = 7,5° -МРТА* до операції – 75,2°, віддалений період – 87,0°, корекція = 11,8° -РРТА* до операції – 94,9°, віддалений період – 80,0°, корекція = 14,9° Клінічні результати: -LEFS* до операції – 53,5 бб., віддалений період – 70,5 бб.	– 25%, транзиторна нейропатія – 25%
[24]	TSF	Гостре вкорочення кінцівки для первинного закриття рани при значних дефектах шкіри кісткової тканини (відкриті переломи кісток гомілки)	18	Тривалість лікування – 314 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс АЗФ – 58,4 дні/см Консолідація досягнута – 94% Результат за шкалою ASAMI*: -відмінний – 67% -добрий – 28% КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Результат за шкалою ASAMI* -відмінний – 50% -добрий – 44% -задовільний – 5% -незадовільний – 0%	Інфекційне незрошення – 5,5%, глибока інфекція – 5,5%, розходження країв рани – 5,5%, сповільнена консолідація – 5,5%
[25]	TSF	Одноетапна (Група 1)/ поступова (Група 2) корекція деформації при переломах великогомілкової кістки	58	Тривалість лікування – 200,9 днів (Група 1) та 195,3 дні (Група 2). КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Результат та критеріями Johner-Wruhs: -відмінний – 78,3% (Група 1) та 80% (Група 2) -добрий – 17,4% (Група 1) та 14,3% (Група 2) -задовільний – 4,3% (Група 1) та 5,7% (Група 2) -незадовільний – 0% (Група 1 та Група 2)	Поверхнева інфекція – 39,1% (Група 1) та 34,3% (Група 2); сповільнена консолідація – 8,7% (Група 1) та 5,7% (Група 2); стійка контрактура суглобу – 4,3% (Група 1) та 5,7% (Група 2)
[28]	TSF	Переломи великогомілкової кістки	25	РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Консолідація досягнута – 100%, Зміщення фрагментів. -фронтальна площа: до операції – 6,1 мм та 5,2°, після корекції – 1,0 мм, 0,8°; ступінь корекції – 83,6% (трансляція) та 84,6% (вісь) -сагітальна площа – до операції – 4,2 мм. та 4°; після корекції – 0,8 мм, 0,3°; ступінь корекції – 80,9% (трансляція) та 92,5% (вісь) КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -відмінний – 100%	Поверхнева інфекція – 48%, сповільнена консолідація – 4%, стійка контрактура суглоба – 4%, втрата корекції – 0%, нейропатія – 0%
[31]	TSF	Корекція деформацій нижньої третини кісток гомілки	19	РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Консолідація досягнута – 100% Кут деформації в сагітальній площині: -до операції – 14,3°, -віддалений результат – 2,8°, -ступінь корекції – 11,5° Кут деформації у фронтальній площині: -до операції – 25,9°, -віддалений результат – 5,9° , -ступінь корекції – 20° КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ шкала AOFAS* для гомілки стопи: -до операції – 66,0 бб., -віддалений результат – 86,1 бб.	Поверхнева інфекція – 26,3%

[35]	TSF	Еквінусна деформація стопи різної етіології (посттравматична; неврологічна; рецидивна; Шарко Марі Тус; Паркінсон; ідіопатична)	26	Тривалість лікування – 50 днів. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Кут еквінусної деформації: -до операції 21,5° -після корекції – 4,9° КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -корекція досягнута – 100%	Поверхнева інфекція – 7,7%, рецидив деформації – 11,5%, перелом шпичі – 3,8%, глибока інфекція – 3,8%.
[36]	TSF	Деформації стопи та гомілковостопного суглобу (посттравматичний еквінус, артропатія Charcot, посттравматична деформація н/з гомілки)	7	РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Кут еквінусної деформації: -до операції 21,1° -після корекції – 7,1° КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ -запропонована шкала ефективності – 1,86/2,0 (93%) -VAS-FA*: до операції - 68,4 бб., післяопераційно - 78,8 бб. -SF-36*: до операції - 88,8 бб., післяопераційно - 90,1 бб.	Поверхнева інфекція – 14,3%, глибока інфекція – 14,3%
[37]	TSF	Кісткові дефекти великогомілкової кістки (корекція за методикою «кісткового транспорту» з одноетапним вкороченням та подальшою поступовою distraкцією)	137	Тривалість лікування – 253 дні. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Індекс консолидації – 59,1 дні/см. Індекс АЗФ – 72,3 дні/см Якість регенерату (модифікована шкала Li): А - 66%, В - 30%, С - 3% Нормалізація кутових показників: -MPTA - 83% пацієнтів -LDTA - 68% пацієнтів -PPTA - 78% пацієнтів -ADTA - 48% пацієнтів Результат за шкалою ASAMI*: -відмінний – 88% -добрий - 12%	
[38]	Spider Frame	Невірні-консолідовані переломи стегнової або великогомілкової кістки, наслідки хвороби Perthes, гіпоплазія стегнової кістки; BVP великогомілкової кістки, недосконалий остеогенез, множинний енхондроматоз	17	Тривалість лікування – 202,7 дні. РЕНТГЕНОЛОГІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Корекція деформації – 30 днів Індекс distraкції – 10,57 днів/см Індекс АЗФ – 98 днів/см Результат за шкалою ASAMI*: -відмінний – 71,4% -добрий – 14,3% -задовільний – 0% -незадовільний – 14,3% Клініко-рентгенологічна шкала Paley: 87/10066 (87%) КЛІНІЧНИЙ РЕЗУЛЬТАТ Результат за шкалою ASAMI*: -відмінний – 57,1% -добрий – 42,9%	Поверхнева інфекція – 100%, глибока інфекція – 5,9%, сповільнена консолидація – 5,9%, тимчасова контрактура суглобу – 11,8%

* BVP (вроджені вади розвитку); DSS (Deformity Severity Score – шкала вираженості деформації), ASAMI (Association for the Study and Application of Methods of Ilizarov – Асоціація з вивчення та застосування методів Ілізарова), MPTA (Medial Proximal Tibial Angle – медіальний проксимальний кут великогомілкової кістки), PPTA (Posterior Proximal Tibial Angle – задній проксимальний кут великогомілкової кістки), HKA (Hip-Knee Angle – кут стегно-коліно), MAD (Mechanical Axis Deviation – відхилення механічної осі), LDFA (Lateral Distal Femoral Angle

– латеральний дистальний кут стегнової кістки), LDTA (Lateral Distal Tibial Angle – латеральний дистальний кут великогомілкової кістки), LLD (Limb Length Discrepancy – різниця довжини нижніх кінцівок), AKSS-F (American Knee Society Functional Score – функціональна шкала Американської асоціації колінного суглоба), AKSS-O (American Knee Society Objective Score – об'єктивна шкала Американської асоціації колінного суглоба), PROMs (Patient-Reported Outcome Measures – показники, що базуються на самооцінці пацієнта), AP та LAT

(Anteroposterior and Lateral – передньо-задня та бокова проекції), FTA (Femoral–Tibial Angle – стегно-великогомілковий кут), LEFS (Lower Extremity Functional Scale – шкала функціонального стану нижньої кінцівки), KSS (Knee Society Score – оцінка стану колінного суглоба за шкалою KSS), AOFAS (American Orthopaedic Foot and Ankle Society – Американська ортопедична асоціація стопи та гомілковостопного суглоба), VAS-FA (Visual Analogue Scale Foot and Ankle – візуально-аналогова шкала для стопи та гомілковостопного суглоба), SF-36 (Short Form Survey Instrument – опитувальник загального стану здоров'я SF-36).

Порівняльна характеристика різних типів КААЗФ

Хоча КААЗФ типу «гексапод» базуються на загальному принципі паралельної кінематики, мають візуальну подібність та здійснюють корекцію з урахуванням тих самих біологічних принципів, різні типи КААЗФ мають свої особливості конструкції та ПЗ, які впливають на їх ефективність та точність корекції деформації (ключовий фактор при порівнянні різних типів КААЗФ).

Відомо, що на сьогодні просторова рамка братів Taylor (TSF) є найбільш уживаним КААЗФ у світі [1, 10]. Точність корекції деформації із застосуванням TSF становить 95-98% [1]. Іншими менш поширеними представниками КААЗФ є: «Orthex Hexapod System» (OrthoPediatrics, Warsaw, Indiana), «Truelok Hexapod System» (TL-HEX; Orthofix, Lewisville, Texas), «MaxFrame» (DePuy, Synthes). Всі ці системи мають подібну структуру до TSF, проте інші алгоритми налаштування та оцінки ступеня деформації в ПЗ (що може призводити до різних кінцевих результатів лікування). Першим дослідженням, де було виконано порівняння ПЗ КААЗФ типу TSF та TL-HEX став експеримент Ferreira N et al. (2015 р.) із застосуванням штучної моделі кістки зі створеною деформацією [41]. Було встановлено, що ПЗ «Truelok Hexapod System» та ПЗ TSF по різному розраховують ступінь деформації (з різницею до 4 мм зміщення) та по різному оцінюють постановку кілець КААЗФ з подальшими кроками корекції деформації. Програмне забезпечення TL-HEX має перевагу над TSF тим, що дає змогу хірургу планувати корекцію навіть у випадках, коли кільця апарата встановлені під необхідним для корекції кутом, а не під прямим (ортогональним) кутом. Наступним було дослідження Iobst CA et al. (2016 р.), де порівнювалась спроможність різних систем КААЗФ типу «гексапод» (з карданним та шарнірним типом кріплення стрижнів до кілець) до корекції деформації [40]. Автори дійшли висновків, що обидва типи кріплення дозволяють виконувати

корекції багатоплощинних деформацій. Однак, з'єднання карданного типу стрижнів менших розмірів з кільцями забезпечує більше зміщення фрагментів кістки за шириною та їх ротацію, тоді як шарнірний тип з'єднання може забезпечити більше подовження. Також, конструкція шарнірного з'єднання краще запобігає імпліменту м'яких тканин при корекції значних кутових деформацій (величиною в 90°); таким чином системи КААЗФ з шарнірним типом з'єднання здатні забезпечити більшу корекцію значних деформацій з меншою кількістю заміни стрижнів. Ще одним порівняльним дослідженням різних типів з'єднання стрижнів із кільцями (на прикладі TL-HEX та TSF) стала робота Fenton C et al. (2021 р.) [19]. Було зроблено висновок, що TL-HEX має кращі властивості жорсткості завдяки шарнірній побудові з'єднання у порівнянні з універсальним карданним шарніром TSF.

Найбільш свіжим експериментальним дослідженням є праця Basha et al. (2022 р.) з порівняльної оцінки корекції деформації штучної кістки [13]. Хоча залишкова деформація після застосування «Orthex Hexapod System» була найменшою (1° у порівнянні з 2,5° після TSF 3° після TL-HEX; різниця статистично недостовірною) всі ці системи показали добрий результат корекції деформації зі ступенем залишкової деформації до 5°. Автори зробили висновок, що всі три системи забезпечують достатній ступінь корекції, однак дещо краще корегувати деформацію можна із застосуванням «Truelok Hexapod System».

Також, на сьогодні існує кілька порівняльних клінічних досліджень вищезгаданих типів КААЗФ. Першим таким дослідженням було дослідження Naude J et al. (2019 р.) із застосуванням TSF та TL-HEX для корекції деформації кісток гомілки після закритого/відкритого їх перелому з та без дефекту кістки [39]. Було встановлено тенденцію до кращої консолідації фрагментів із застосуванням TSF (100% консолідації проти 92%), проте кількість відмінних результатів за шкалою ASAMI була дещо більшою в групі TL-HEX (73,9% проти 47,6% в групі TSF), хоча і не статистично достовірно ($p = 0.33$). Також, не спостерігалось різниці в індексі АЗФ в обох групах ($p = 0.55$) та різниці у суб'єктивній оцінці результату лікування (за опитувальниками EQ5D, TUG та FSST). Результати цього дослідження свідчать про те, що обидва пристрої КААЗФ мають подібні клінічні, функціональні та рентгенологічні результати. Іншим таким дослідженням є робота Messner et al. (2021 р.), де автори порівнювали результати подовження кісток гомілки у дітей за допомогою TSF та системи «Orthex Hexapod System» [9]. При оцінці результатів було виявлено, що тривалість лікування була

дещо меншою при застосування системи «Orthex» (203 дні проти 230 днів, $p = 0,06$); якість кісткового регенерату була краще у групи пацієнтів з КААЗФ «Orthex» ($p = 0,029$); кількість замін стрижнів була меншою у групи пацієнтів з КААЗФ «Orthex» ($p < 0,0001$); кількість поверхневих інфекційних ускладнень була значно більшою в групі TSF (у 40% пацієнтів проти 18%, $p < 0,001$). Однак віддалені клінічні результати були подібними в обох групах пацієнтів ($p = 0,92$). Автори зробили висновок, що система «Orthex» забезпечує кращу якість кісткового регенерату з меншою кількістю ускладнень, однак, обидві системи КААЗФ забезпечують точну корекцію деформації та гарантують прогнозовано добрий результат лікування.

В літературі було знайдено також декілька порівняльних досліджень із застосуванням КААЗФ в певних клінічних ситуаціях. Так, Namada T et al. [14] було виконане порівняння застосування TSF для корекції варусної та вальгусної деформації колінного суглобу та для подовження кісток гомі-

ки. Автори дійшли висновку, що корекція варусної деформації потребує значно більше часу у порівнянні з корекцією вальгусної деформації та різниці довжини ніг (індекс АЗФ складав 83,4, 60,5 та 51,2 дні/см у трьох групах відповідно). В іншій роботі [22] порівнювалось застосування TSF для корекції деформації гомілки при хворобі Блаунта у пацієнтів двох груп (інфантильна та адолесцентна форма захворювання). В підсумку автори зробили висновок, що результати лікування в обох групах є подібними і TSF може бути успішно застосований в обох вікових групах. Також, досліджувалась ефективність TSF при корекції вроджених та набутих деформацій сегментів нижньої кінцівки [27]. Індекс подовження виявився майже однаковим в обох групах (2,2 та 2,0 місяці/см), проте автори виявили значно більшу кількість ускладнень у групі пацієнтів з вродженими деформаціями.

Порівняльний аналіз різних типів КААЗФ представлено у таблиці 3.

Таблиця № 3

Порівняльний аналіз різних типів КААЗФ

Автори:	Рік:	Системи КААЗФ:	Порівняння:	Дизайн дослідження:	Результати:
Basha et al [13]	2022	TSF, TL-Hex, Orthex	Корекція деформації	Біомеханічне дослідження на штучних моделях кісток	1) ПЗ TL-Hex краще оцінює величину деформації за інші системи; 2) немає різниці в точності корекції деформації; 3) немає різниці в частоті заміни стрижнів
Fenton et al [19]	2021	TSF, TL-Hex	Характеристики жорсткості	Механічне дослідження із застосуванням торсійних та осьових навантажень	TSF має меншу жорсткість з'єднання (карданне) ніж TL-HEX (шарнірне з'єднання)
Iobst et al [40]	2016	TSF, TL-Hex	Корекція деформації	Експеримент на моделях кісток	1) карданні з'єднання TSF забезпечують кращу корекцію ротації та трансляції, шарнірні з'єднання TL-Hex забезпечують кращу корекцію довжини 2) при значних деформаціях положення кільце TL-Hex не призводить до імпіджменту м'яких тканин 3) шарнірне з'єднання TL-Hex дозволяє проводити більшу корекцію з меншою частотою заміни стрижнів
Ferreira and Birkholtz [41]	2015	TSF, TL-Hex	Рентгенографічний аналіз	Біомеханічне дослідження на моделі кісток гомілки з переломом	1) наявна різниця в оцінці величини деформації та налаштуваннях апарату між TSF та TL-Hex при постановці кільця під кутом 2) рентгенографічний аналіз в обох системах принципово різний
Messner et al [9]	2021	TSF, Orthex	Оцінка клінічних та рентгенологічних результатів у дітей при корекції деформацій кісток гомілки	Проспективне дослідження двох груп в різні проміжки часу	1) краща якість кісткового регенерату після застосування Orthex 2) подібна ефективність корекції деформацій та індексу консолидації 3) більша кількість поверхневих інфекційних ускладнень в групі TSF

Naude et al [39]	2019	TSF, TL-Hex	Оцінка клінічних результатів при складних переломах кісток гомілки	Ретроспективне дослідження відкритих/закритих переломів великогомілкової кістки з/без кісткового дефекту	Подібні клінічні, функціональні та рентгенологічні результати після застосування обох систем
------------------	------	-------------	--	--	--

Обмеження та недоліки застосування КААЗФ

Незважаючи на високу ефективність КААЗФ, під час їхнього використання можуть виникати певні ускладнення. Найпоширенішими ускладненнями є: інфекція в місці введення шпиль/стрижнів, тимчасові контрактури суглобів та порушення консолидації кісткових фрагментів.

Поверхневі інфекційні ускладнення в місцях введення шпиль є найпоширенішим ускладненням, яке зустрічається у 0 -100% пацієнтів [17, 38]. Така різноманітність в різних групах дослідження пояснюється наступними факторами: 1) не всі автори розглядають поверхневу інфекцію у якості ускладнення (багато хто описує це як несприятливу подію); 2) є різні визначення поверхневої інфекції (почервоніння в місцях введення шпиль/стрижнів або ж наявність виділень); 3) різні країни та культури догляду за КААЗФ та різні режими гігієни місць введення шпиль/стрижнів зумовлюють різну частоту цього ускладнення. Тимчасові контрактури суглобів також є частим ускладненням, яке виникає через обмеження рухливості суміжних суглобів під час довготривалого процесу перебування пацієнта в КААЗФ; частота виникнення тимчасових контрактур становить 10-25% [7, 23]. Останнім частим ускладненням серед вищезгаданих, однак найбільш небезпечним, є сповільнена консолидація кісткових фрагментів, що зустрічається у 4-6,7% пацієнтів [7, 22]. Незважаючи на виникнення ускладнень, їх лікування переважно можливе консервативними методами без необхідності хірургічного втручання. Таким чином, поверхневі інфекції вимагають місцевої гігієни та антибіотикотерапії, тимчасові контрактури – фізіотерапії, а сповільнена консолидація – тимчасового припинення дистракції або маневру типу «акордеон» (почергово компресія та дистракція).

Окрім ускладнень, під час застосування КААЗФ інколи виникають і суто технічні труднощі, пов'язані зі специфікою фіксатора. Правильне розміщення фіксатора вимагає точного розрахунку параметрів корекції. У статті Iobst et al. (2023 p.) підкреслюється, що неправильна установка фіксатора може призвести до недостатньої корекції або навіть до погіршення деформації [1]. Таким чином,

в процесі лікування 11-41,7% пацієнтів потребують додаткових регулювань КААЗФ за допомогою ПЗ [2, 4]. Ще одним недоліком даного типу фіксаторів є значна тривалість лікування, яке може відбуватися впродовж 114-387 днів [16, 23], що призводить до тимчасового обмеження рухливості пацієнтів та знижують їх соціальну активність; а це, в свою чергу негативно впливає на психологічний стан пацієнта та знижує якість життя.

Специфічним недоліком КААЗФ є висока вартість продукту та недостатня доступність в країнах з низькими економічними показниками. Так, вартість TSF для пацієнта може сягати 10 000-15 000 доларів [1, 10], а витрати на лікування та подальшу фізіотерапію можуть сягати 20 000-25 000 доларів [11].

Перспективи розвитку КААЗФ

КААЗФ зарекомендували себе як ефективний інструмент для лікування складних деформацій та дефектів кісток з мінімальною кількістю серйозних ускладнень. Однак, сучасні технології та інновації відкривають нові можливості для вдосконалення цих пристроїв.

Однією з найперспективніших напрямків розвитку КААЗФ є інтеграція роботизованих систем, які дозволяють автоматизувати процес корекції деформацій. Так, Gigi et al. (2021 p.) описують роботизовану систему «Auto Strut», яка автоматично регулює положення стрижнів фіксатора та дозволяє досягти значної точності корекції (100%) із малою похибкою (до 1 мм в 94% випадків) [6]. Така автоматизація процесу дозволяє зменшити навантаження на медичну систему та покращити комфорт пацієнтів.

Наступним перспективним напрямком є розробка персоналізованих підходів. Так, використання технології 3D-друку та передопераційних індивідуальних шаблонів дозволяє створювати фіксатори, які точно відповідають анатомічним особливостям пацієнта. У дослідженні Burton et al. (2024 p.) було показано, що використання 3D-друку для створення персоналізованих шаблонів дозволяє досягти точності корекції з похибкою в 0,6-3,5° [3].

Ще одним напрямком розвитку КААЗФ є удосконалення ПЗ та алгоритмів розрахунку корекції

деформації. Так, різні системи КААЗФ мають різні алгоритми оцінки деформації та розрахунку її корекції [13, 41]. Таким чином виникають неспівпадіння в результатах застосування різних систем КААЗФ для корекції тієї самої деформації, що потребує уніфікації ПЗ та подальшого їх удосконалення.

Останнім, але не менш значимим напрямком розвитку КААЗФ є зниження собівартості фіксатора та масове стандартизоване виробництво. Наприклад, у статті Iobst et al. (2023 р.) підкреслюється, що використання масового виробництва та стандартизація компонентів фіксатора може зменшити вартість готового продукту на 20-30% [1].

Висновки

1. КААЗФ є малоінвазивним та ефективним інструментом для корекції багатоплощинних деформацій та дефектів кісток як у дітей, так і у дорослих пацієнтів, включаючи вроджені деформації, посттравматичні дефекти та неправильне зрощення кісток. У порівнянні з класичним апаратом Ілізарова КААЗФ забезпечують кращу ступінь корекції деформації та меншу кількість ускладнень.

2. Просторова рамка братів Taylor (TSF) на сьогодні є одним із найпопулярніших та найефективніших КААЗФ, однак має дещо вищу частоту ускладнень порівняно з іншим типом фіксатора (Orthex Hexapod System). Нова роботизована система «Auto Strut» демонструє високу точність корекції з мінімізацією похибки через людський фактор.

3. Найпоширенішими ускладненнями під час застосування КААЗФ є поверхневі інфекційні укладення в місцях введення шпич/стрижнів, тимчасові контрактири суглобів та сповільнена консолидація фрагментів кісток. Всі ці ускладнення не вимагають хірургічного втручання і лікуються консервативними методами.

4. Перспективи розвитку КААЗФ пов'язані із застосуванням роботизованих систем для автоматичної корекції деформації, технологій 3D-друку під час передопераційного планування та покращенням алгоритмів розрахунку величини деформації та шляхів її корекції. Однак, висока вартість КААЗФ на сьогодні все ще залишається однією з головних проблем, яка обмежує широке застосування цих систем.

5. На сьогодні немає досліджень стосовно застосування КААЗФ для корекції посттравматичних деформацій та дефектів довгих кісток кінцівок у пацієнтів внаслідок бойової травми, що обумовлює необхідність проведення таких досліджень.

References

- Iobst C, Ferreira N, Kold S. A review and comparison of hexapod external fixators. *J Pediatr Orthop Soc North Am.* 2023;5(1):627. doi:10.55275/JPOSNA-2023-627
- Singh P, Sabat D, Dutt S, Sehrawat R, Prashanth B, Vichitra A, et al. Accuracy and efficacy of software-guided bony realignment in periarticular deformities of the lower limb. *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2021;16(2):65-70. doi:10.5005/jp-journals-10080-1524
- Burton NJ, Oxley B. Accuracy of correction of a hexapod frame, patient-specific osteotomy and reduction guides, and hinged circular external fixation in a 3D-printed canine antebrachial deformity model. *Front Vet Sci.* 2024;11:1296371. doi:10.3389/fvets.2024.1296371
- Danişman M, Yilmaz ET, Özdemir E, Tuncay O, Yilmaz G. Accuracy of the hexapod external fixator in treating tibial angular deformities with or without limb length discrepancy: a retrospective study. *J Pediatr Orthop B.* 2023;32(6):611-6. doi:10.1097/BPB.0000000000001101
- Hariyan SV, Tsybul'skyi OS, Makhov'skyi VP, Salii ZV. Experience of the segmental bone defects' treatment for patients with combat trauma using the method of distraction osteogenesis. *Orthop Traumatol Prosthetics.* 2024;(4):71-8. doi:10.15674/0030-59872023471-78
- Gigi R, Mor J, Lidor I, Ovadia D, Segev E, Ben-Shlomo I. Auto Strut: a novel smart robotic system for external fixation device for bone deformity correction, a preliminary experience. *J Child Orthop.* 2021;15(2):130-6. doi:10.1302/1863-2548.15.210063
- Shi B, Zhang Z, Ji G, Cai C, Shu H, Ma X. Bone transport for large segmental tibial defects using Taylor spatial frame versus the Ilizarov circular fixator. *Orthop Surg.* 2024;16:2157-66. doi:10.1111/os.14192
- Zhang L, Yan Y, Ren P, Hou Y, Liu D, Fan C, et al. Staged treatment of ankle deformity and first metatarsal deficiency after motorcycle spoke injury with Taylor external frame combined with fibular head grafting: a case report. *Front Surg.* 2024;11:1391384. doi:10.3389/fsurg.2024.1391384
- Messner J, Chhina H, Davidson S, Abad J, Cooper A. Clinical outcomes in pediatric tibial lengthening and deformity correction: a comparison of the Taylor Spatial Frame with the Orthex Hexapod System. *J Child Orthop.* 2021;15(2):114-21. doi:10.1302/1863-2548.15.200165
- Keshet D, Eidelman M. Clinical utility of the Taylor spatial frame for limb deformities. *Orthop Res Rev.* 2017;9:51-61. doi:10.2147/ORR.S113420Ferreira N, Marais LC. Closed Distraction and Gradual Deformity Correction of Stiff Hypertrophic Tibial Nonunions with Hexapod External Fixation. *JBJS Essent Surg Tech.* 2016;6(4):e36. Published 2016 Oct 26. doi:10.2106/JBJS.ST.16.00064
- Liu SG, Yu DJ, Li H, Opoku M, Li J, Zhang BG, et al. Combination of external fixation using digital six-axis fixator and internal fixation to treat severe complex knee deformity. *J Orthop Surg Res.* 2023;18(1):65. doi:10.1186/s13018-023-03530-0.
- Basha K, Alawadhi A, Alyammahi M, Sukeik M, Abdulhadi HS, Dsouza AP, et al. Comparison of three circular frames in lower limb deformity correction: a biomechanical study. *Cureus.* 2022;14(5):e25271. doi:10.7759/cureus.25271.
- Hamada T, Matsubara H, Yoshida Y, Ugaji S, Tsuchiya H. Comparison of treatment indices associated with the correction and lengthening of deformities along various lower limb

frontal plane directions. *J Clin Orthop Trauma*. 2019;10(Suppl 1):S57-S61. doi:10.1016/j.jcot.2019.01.003

14. Ren French JM, Filer J, Hogan K, Fletcher JWA, Mitchell S. Computer Hexapod-assisted Orthopaedic Surgery for the Correction of Multiplanar Deformities throughout the Lower Limb. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2024;19(1):9-14. doi:10.5005/jp-journals-10080-1608

15. Lahoti O, Abhishetty N, Shetty S. Correction of Foot Deformities from Charcot Arthropathy with the Taylor Spatial Frame: A 7-14-year Follow-up. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2021;16(2):96-101. doi:10.5005/jp-journals-10080-1525

16. Lu Y, Li J, Qiao F, Xu Z, Zhang B, Jia B, et al. Correction of severe lower extremity deformity with digital hexapod external fixator based on CT data. *Eur J Med Res*. 2022;27(1):252. doi:10.1186/s40001-022-00887-6.

17. Reitenbach E, Rödl R, Gosheger G, Vogt B, Schiedel F. Deformity correction and extremity lengthening in the lower leg: comparison of clinical outcomes with two external surgical procedures. *Springerplus*. 2016;5(1):2003. doi:10.1186/s40064-016-3666-3

18. Fenton C, Henderson D, Samchukov M, Cherkashin A, Sharma H.

Comparative stiffness characteristics of Ilizarov- and hexapod-type external frame constructs. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2021;16(3):138-143. doi:10.5005/jp-journals-10080-1539.

19. Ugaji S, Matsubara H, Aikawa T, Tsuchiya H. Efficacy of Temporary Intentional Leg Shortening and Deformation for Treatment of Massive Bone and Soft Tissue Defects in Three Patients. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2022;17(3):195-201. doi:10.5005/jp-journals-10080-1567

20. Seymour J, Vij N, Belthur M. Extreme Genu Recurvatum Deformity in a Pediatric Patient With Spondyloepiphyseal Dysplasia: Gradual Correction With Z-plates and Hexapod Frame. *Cureus*. 2022;14(5):e25265. Published 2022 May 23. doi:10.7759/cureus.25265

21. Mare PH, Marais LC. Gradual Deformity Correction with a Computer-assisted Hexapod External Fixator in Blount's Disease. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2022;17(1):32-37. doi:10.5005/jp-journals-10080-1549

22. Du H, Li H, He X, Wu Y. Gradual Transverse Transport of Naturally Tibialized Fibula Using Hexapod Frames to Treat Neglected Type V Tibial Segmental Defects. *Orthop Surg*. 2024;16(9):2123-2131. doi:10.1111/os.14191

23. Hernández-Irizarry R, Quinlan SM, Reid JS, Toney CB, Rozbruch SR, Lezak B, et al.

Intentional temporary limb deformation for closure of soft-tissue defects in open tibial fractures. *J Orthop Trauma*. 2021;35(6):e189-e194. doi:10.1097/BOT.0000000000001988.

24. Liu Y, Cai F, Liu K, Zhang X, Li H, Fu X, et al. Intraoperative acute correction versus postoperative gradual correction for tibial shaft fractures with multiplanar posttraumatic deformities using the hexapod external fixator. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):803. doi:10.1186/s12891-021-04505-0.

25. Minoughan CE, Schumaier AP, Avilucea FR. Knee Sepsis after Suprapatellar Nailing of an Open Tibia Fracture: Treatment with Acute Deformity and External Fixation. *Case Rep Orthop*. 2019;2019:3185286. doi:10.1155/2019/3185286

26. Horn J, Steen H, Huhnsstock S, Hvid I, Gunderson RB. Limb lengthening and deformity correction of congenital and acquired deformities in children using the Taylor Spatial Frame. *Acta Orthop*. 2017;88(3):334-340. doi:10.1080/17453674.2017.1295706

27. Liu Y, Li H, Liu J, Zhang X, Yushan M, Liu Z, et al. Long bone fracture reduction and deformity correction using the hexapod external fixator with a new method: a feasible study and preliminary results. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):221. doi:10.1186/s12891-021-04097-9.

28. Koren L, Keren Y, Eidelman M. Multiplanar Deformities Correction Using Taylor Spatial Frame in Skeletally Immature Patients. *Open Orthop J*. 2016;10:71-79. doi:10.2174/1874325001610010603

29. Galal S. Nonunion of vascularized fibula with shortening and multiplanar deformity in a 6 years old managed simultaneously with hexapod circular external fixator.

JAAOS Glob Res Rev. 2024;8(11):e24.00260. doi:10.5435/JAAOSGlobal-D-24-00260.

30. Yang X, Du H, Yin X, Gong X, Wang Y, Li Y, et al. Optimizing outcomes in distal tibial deformity correction: the role of supramalleolar osteotomy with computer-assisted hexapod external fixator. *Orthop Surg*. 2024;16(9):2173-2180. doi:10.1111/os.14201.

31. Achudan S, Premchand A, Low JS, Decruz J, Khan SA. Simultaneous Correction of a Tibia Deformity and Nonunion in Achondroplasia: A Case Report. *Malays Orthop J*. 2022;16(2):131-135. doi:10.5704/MOJ.2207.018

32. Kadado A, Akioyamen NO, Garfinkel R, Nahm N, Zeni F. Staged Correction of Severe Recurrent Clubfoot Deformity With Dislocation of the Chopart Joint Using a Hexapod External Fixator and Unconventional Arthrodesis. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*. 2022;6(4):e21.00116. Published 2022 Apr 7. doi:10.5435/JAAOSGlobal-D-21-00116

33. Çınar BM, Güler ÜÖ. Supramalleolar osteotomy with a hexapod type external fixator for the treatment of ankle joint three planar deformity: Case report. *Jt Dis Relat Surg*. 2020;31(2):372-376. doi:10.5606/ehc.2020.73893

34. Dabash S, Potter E, Catlett G, McGarvey W. Taylor Spatial Frame in Treatment of Equinus Deformity. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2020;15(1):28-33. doi:10.5005/jp-journals-10080-1452

35. Manggala Y, Angthong C, Primadhi A, Kungwan S. The deformity correction and fixator-assisted treatment using Ilizarov versus Taylor spatial frame in the foot and ankle. *Orthop Rev (Pavia)*. 2018;9(4):7337. doi:10.4081/or.2017.7337

36. Sheridan GA, Pang A, Page BJ, Greenstein MD, Cardoso GS, Amorim R, et al. The management of tibial bone defects: a multicenter experience of hexapod and Ilizarov frames. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*. 2023;7(8):e23.00033. doi:10.5435/JAAOSGlobal-D-23-00033.

37. Tekin AÇ, Çabuk H, Dedeoğlu SS, Saygılı MS, Adaş M, Esenyel CZ, et al. The results of bone deformity correction using a spider frame with web-based software for lower extremity long bone deformities. *SICOT J*. 2016;2:11. doi:10.1051/sicotj/2016005.

38. Naude J, Manjra M, Birkholtz FF, Barnard AC, Glatt V, Tetsworth K, et al.

Outcomes following treatment of complex tibial fractures with circular external fixation: a comparison between the Taylor Spatial Frame and TrueLok-Hex.

Strategies Trauma Limb Reconstr. 2019;14(3):142-147. doi:10.5005/jp-journals-10080-1443.

39. Iobst CA, Samchukov M, Cherkashin A. A comparison of deformity correction capabilities in hexapod frame systems. *J Limb Lengthen Reconstr*. 2016;2:29-34.

40. Ferreira N, Birkholtz F. Radiographic analysis of hexapod external fixators: fundamental differences between the Taylor Spatial Frame and TrueLok-Hex. *J Med Eng Technol*. 2015;39(3):173-176.

Modern Aspects of the Use of Computer-Assisted External Fixation Devices (Literature Review)

Suvorov V.L.^{1✉}, Yevlantieva T.A.¹, Kulyk Yu.A.¹, Kozik Ye.V.¹, Larkevych O.H.¹, Demian Yu.Yu.¹

¹SI «Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Summary. *The use of computer-assisted external fixation devices (CAEF) is an effective and minimally invasive method for correcting multiplanar deformities and bone defects in both children and adults. They allow for a higher degree of correction compared to the classic Ilizarov apparatus, while reducing the incidence of complications. Among the most effective CAEF systems are the Taylor Spatial Frame (TSF) and the Orthex Hexapod System. Additionally, the robotic Auto Strut system demonstrates high correction accuracy with minimized errors. The most common complications associated with CAEF use include superficial infections, temporary joint contractures, and delayed consolidation, which are generally managed conservatively.*

Keywords: *computer-assisted external fixation devices; limb deformity.*