

©А. І. ЦВЯХ¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0884-4024>

©А. Я. ЧАЙКІВСЬКИЙ²

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5596-4202>

©А. М. ОБАРАНЧУК²

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7131-1910>

©А. Я. ГОСПОДАРСЬКИЙ¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9394-2675>

¹Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, Тернопіль, Україна

²КНП «Тернопільська міська комунальна лікарня швидкої допомоги», Тернопіль, Україна

3D-реконструкція поліструктурних ушкоджень верхнього плечового пояса після вогнепальних поранень

Мета роботи: продемонструвати клінічний випадок застосування віртуального 3D-моделювання та індивідуально виготовленої блокованої LCP-пластини у хірургічному лікуванні багатоуламкового вогнепального перелому ключиці з дефектом кісткової тканини.

Матеріали і методи. Проведено обстеження та лікування постраждалого військовослужбовця 42 років із вогнепальним пораненням правої половини грудної клітки, переломом ключиці, лопатки та ребер. Проведено комп'ютерну томографію (КТ) з побудовою дзеркальної 3D-моделі контралатеральної ключиці. На її основі створено індивідуальну титанову пластину Ti-6Al-4V ELI. Кістковий дефект (приблизно 2 см) замінено аутотрансплантатом із крила клубової кістки, адаптований за 3D-шаблоном.

Результати. Індивідуально змодельована LCP-пластина забезпечила анатомічно точне відновлення контура ключиці та стабільну фіксацію уламків без потреби у внутрішньоопераційному згинанні. Тривалість операції становила 85 хв, крововтрата – до 200 мл. Загоєння рани відбулося первинним натягом. Через 4 тижні рентгенографія підтвердила правильне положення імплантата, а через 3 місяці спостерігалось повне зрощення кістки та відновлення функції плечового суглоба.

Висновки. Застосування індивідуально промодельованої LCP-пластини на основі 3D-моделювання дозволяє досягти прецизійного анатомічного відновлення, стабільності остеосинтезу та швидкої реабілітації при складних післявогнепальних переломах ключиці.

Ключові слова: 3D-моделювання; поліструктурні ушкодження; перелом ключиці; вогнепальне поранення; індивідуальний фіксатор; LCP-пластина.

Постановка проблеми й аналіз останніх досліджень та публікацій. Упродовж останнього десятиліття з'явилися нові підходи та набули значного поширення в операційному лікуванні 3D-технології, що широко почали використовуватися в травматологічній практиці. Особливу увагу дослідників привертає можливість застосування персоналізованих друкованих пластин (patient-specific plates, PSP) у лікуванні комбінованих складних переломів кісток плечового пояса, де анатомічна форма та широкі функціональні можливості зумовлюють індивідуальний підхід до відновлення кісткової структури.

Ряд експериментальних та комп'ютерних досліджень підтверджують переваги PSP над типовими анатомічними пластинами у плані розподілу навантаження та точності геометричного відтворення з урахуванням можливості швидкого реабілітаційного лікування. Було доведено, що

тонкостінні індивідуалізовані 3D-пластини забезпечують рівномірну передачу зусиль уздовж кісткових сегментів ключиці та лопатки і покращення рухової активності в даному сегменті [1]. Подібні результати наведено у моделюваннях, де використано топологічну оптимізацію конструкції на основі КТ-даних пацієнтів [2]. Ці дослідження засвідчили, що персоналізовані пластини потенційно зможуть покращити стабільність в ділянці перелому, знизити ризик утворення псевдоартрозу, а також дають змогу розпочати ранню реабілітацію.

Вибір матеріалу також відіграє значну роль. Дослідження на моделях показали, що титан (Ti-6Al-4V ELI) має оптимальне співвідношення міцності й біосумісності, тоді як нержавіюча сталь та магнієві сплави демонструють іншу жорсткість і розподіл напружень [3]. Такі результати створюють підґрунтя для матеріал-орієнтованої оптимі-

зації дизайну кастомних фіксаторів з урахуванням специфіки кісткової структури кожного пацієнта.

Інші клінічні роботи стосуються поєднання 3D-моделей або друкованих гідів із передконтуруванням стандартних титанових пластин, що забезпечує краще прилягання імплантата та меншу частоту симптомної «апаратурності». Такі підходи наближаються до концепції персоналізованого остеосинтезу, хоча не передбачають повного 3D-друку самої пластини.

Згідно з численними оглядами, навіть сучасні анатомічно передконтуровані титанові пластини залишаються джерелом дискомфорту в 5–27 % випадків, що часто вимагає їх видалення [9, 10]. Основною причиною є недостатнє прилягання пластини до складної S-подібної форми ключиці, а також подразнення шкіри та підшкірної клітковини [4]. Крім того, у 1–7 % спостерігаються рефрактури після зняття фіксатора. Ці показники формують раціональне припущення, що кастомізовані 3D-друковані пластини можуть знизити частоту таких ускладнень, забезпечивши точну відповідність анатомічній кривизні.

Огляди підкреслюють, що персоналізовані фіксатори загалом демонструють позитивні біомеханічні властивості, скорочують час операції та підвищують точність остеосинтезу. Водночас обидва джерела наголошують на нестачі багатоцентричних проспективних досліджень, відсутності стандартизації технологічних протоколів та економічних оцінок. Додатково актуальними залишаються питання біосумісності матеріалів, довготривалої втомної міцності та регуляторного схвалення для клінічного використання.

Наявні літературні дані свідчать, що персоналізовані 3D-друковані пластини для ключиці та суглобових поверхонь лопатки мають значний потенціал покращити анатомічну точність фіксації та знизити частоту ускладнень, характерних для традиційних імплантів. Проте до остаточного підтвердження ефективності потрібні проспективні рандомізовані порівняльні дослідження, що оцінюватимуть не лише клінічні та функціональні результати, а й економічну доцільність технології [5].

Мета роботи: продемонструвати клінічний випадок застосування віртуального 3D-моделювання та індивідуально виготовленої блокованої LCP-пластини у хірургічному лікуванні багатоуламкового вогнепального перелому ключиці з дефектом кісткової тканини.

Матеріали і методи. Вогнепальні ушкодження грудної клітки з ураженням ключиці та проксимальних відділів лопатки становлять одну з найскладніших категорій травм через поєднання дефектів кіст-

кової тканини, ризик інфекційних ускладнень і порушення функціонування плечового пояса. Використання технологій віртуального 3D-моделювання та індивідуалізованих фіксаторів із можливістю заміщення кісткового дефекту аутоотрансплантатом дозволяє відновити анатомічну структуру кістки, мінімізуючи інтраопераційну травматизацію та покращуючи функціональні результати.

Хворий А. 1983 р. н., військовослужбовець. Дата травми – серпень 2025 р. Після обстеження було встановлено діагноз: вогнепальне кульове наскрізне поранення правої половини грудної клітки з багатоуламковим переломом лопатки, переломом II–III ребер, середньої третини правої ключиці, гемопневмотораксом справа, забоем верхньої частки правої легені.

На рентгенограмі: перелом середньої третини правої ключиці зі зміщенням уламків. Між уламками спостерігається діастаз із порушенням осі кістки (рис. 1). Багатоуламковий перелом правої лопатки зі зміщенням та наявністю сторонніх тіл. Органи грудної клітки – без видимих патологічних змін. Плевральні порожнини – вільні.

Після первинної хірургічної обробки ран та стабілізації стану хворому було запропоноване операційне лікування з приводу перелому ключиці та акроміального відростка лопатки.

Передопераційне планування. З метою оптимізації фіксації та відновлення анатомічної форми ключиці проведено комп'ютерну томографію (КТ) грудної клітки з наступним 3D-реконструюванням



Рис. 1. Перелом середньої третини правої ключиці зі зміщенням уламків, уламковий перелом акроміального відростка правої лопатки з наявністю сторонніх тіл.

кісткових структур. Враховуючи наявність значного дефекту кісткової тканини правої ключиці та багатоуламкового перелому акроміального відростка правої лопатки, було вирішено виконати МОС переломів з індивідуалізованим підбором фіксатора використанням кісткового аутотрансплантата. За допомогою спеціалізованого обладнання було створено дзеркальну модель інтактної лівої ключиці, на основі якої розроблено індивідуальну 3D-модель фіксатора типу LCP з урахуванням довжини, кривизни та розташування отворів для гвинтів (рис. 2). Модель фіксатора виготовлена з титану Ti-6Al-4VELI методом селективного лазерного плавлення (SLM).



Рис. 2. Надрукована 3D-анатомічна модель ключиці для передопераційної симуляції остеосинтезу та визначення оптимальної довжини гвинтів.

Результати. У жовтні 2025 р. виконано операційне втручання: відкрито репозицію уламків правої ключиці з артродезом акроміально-ключичного зчленування та остеосинтезом індивідуально змодельованою LCP-пластиною; заміщення кісткового дефекту аутотрансплантатом із крила клубової кістки (рис. 3).

Після виконання розрізу візуалізовано уламки ключиці з дефектом приблизно 2 см. Проведено ретельну репозицію під інтраопераційним контролем 3D-моделі. Індивідуальна LCP-пластина щільно відповідала анатомічному профілю кістки, що дозволило досягти стабільної фіксації без додаткового згинання. Для заміщення дефекту використано кортикально-губчастий аутотрансплантат, адаптований до форми дефекту за 3D-шаблоном. Фіксацію завершено гвинтами 3,5 мм.



Рис. 3. Інтраопераційний етап фіксації ключиці анатомічною блокованою пластиною (LCP).

Краї кісткового фрагмента анатомічно узгоджені з вигином пластины, що свідчить про прецизійне передопераційне 3D-моделювання та індивідуальне підбирання імплантата за даними 3D-реконструкції.

Така методика відповідає концепції patient-specific fixation plate, яка забезпечує точне анатомічне відновлення контура ключиці, рівномірний розподіл механічного навантаження, стабільність при мінімальному порушенні окістя та сприятливі умови для кісткового зрощення (рис. 4).



Рис. 4. Завершальний етап позиціонування пластины перед остаточним зашиванням рани.

Пацієнт отримував антибактеріальну, протизапальну та знеболювальну терапію, профілактику тромбоемболічних ускладнень. З 2-го дня розпочато пасивні рухи в ліктьовому суглобі, з 10-го – у плечовому. Рана загоїлась первинним натягом. Контрольна рентгенограма через 4 тижні підтвердила правильне положення імплантата та відсутність вторинного зміщення уламків (рис. 5).



Рис. 5. Контрольна рентгенографія у післяопераційному періоді.

Пацієнта виписали у задовільному стані з рекомендацією амбулаторного нагляду, ЛФК та поступового відновлення функції правої верхньої кінцівки.

Обговорення. У представленому клінічному випадку застосування індивідуально промодельованої LCP-пластини, виготовленої за технологією 3D-моделювання, для фіксації багатоуламкового вогнепального перелому правої ключиці та лопатки дозволило досягти точного анатомічного відновлення навіть за наявності кісткового дефекту та значного ураження м'яких тканин. Поєднання віртуального хірургічного планування та адитивного виробництва забезпечило високоточне передопераційне контурування імплантата відповідно до індивідуальної анатомії пацієнта, що усунуло потребу у внутрішньоопераційному згинанні пластини та мінімізувало маніпуляції в ділянці травми. Це, у свою чергу, сприяє скороченню тривалості операційного втручання, забезпеченню стабільної фіксації уламків і повному зрощенню кістки з відновленням функції плечового суглоба.

Згідно з даними літератури, традиційні методи остеосинтезу ключиці – міжуламкове гвинтове фіксування, серкляж, інтрамедулярна фіксація чи стандартні передконтуровані пластини часто супро-

джуються неповною відповідністю анатомічному профілю кістки та розвитком післяопераційних ускладнень. Legoix та співавт. [6] повідомили, що серед 1350 пацієнтів, яким виконували відкриту репозицію з внутрішньою фіксацією, повторні операції потребували 24,6 %, частота незрощень становила 2,6 %. Симптомна «апаратність» з необхідністю видалення фіксатора відзначається у 5–27 % випадків [7]. Недостатня адаптація пластини до анатомічної кривизни кістки може спричинювати локальне подразнення, затримку формування кісткової мозолі або вторинне зміщення уламків через концентрацію напружень у зоні контакту «пластина – кістка».

Ключовим чинником успішного лікування переломів ключиці є досягнення анатомічно точної репозиції, оскільки ступінь відновлення довжини та кута кістки прямо впливає на функціональний результат. Відомо, що вкорочення ключиці на >2 см достовірно підвищує ризик незрощення. Незважаючи на наявність анатомічно передконтурованих пластин, індивідуальній відмінності пацієнтів у формі та торсії ключиці часто зумовлюють необхідність додаткового згинання пластини під час операції, що подовжує втручання і може послаблювати конструкцію. Натомість використання пацієнтоспецифічних 3D-друкованих пластин або попередньо зігнутих пластин, створених на основі 3D-моделі контра-латеральної ключиці, забезпечує більш точне прилягання до поверхні кістки та стабільну фіксацію без додаткового моделювання.

У наведеному випадку передопераційне тривимірне планування дозволило виконати дзеркальне моделювання інтактної лівої ключиці, яка слугувала анатомічним еталоном для реконструкції ушкодженої сторони. Такий підхід узгоджується з результатами Kim та співавт. [5], які досягли 100 % зрощення у пацієнтів зі складними післятравматичними деформаціями ключиці завдяки поєднанню віртуального планування та 3D-друкованих пластин. Подібні результати отримали інші автори, котрі підтвердили доцільність використання персоналізованих металевих пластин у травматології, відзначивши зменшення тривалості операції та нижчу частоту ускладнень, пов'язаних із фіксатором [7].

Додатковою перевагою індивідуального моделювання є можливість віртуального планування реконструкції кісткового дефекту з подальшим моделюванням аутоотрансплантата. У нашого пацієнта дефект довжиною близько 2 см було замінено аутоотрансплантатом із крила клубової кістки, форма якого була попередньо змодельована за 3D-шаблоном. Це узгоджується з результатами біомеханічних досліджень, у яких показано, що

пацієнтоспецифічні імпланти забезпечують більш рівномірний розподіл навантаження та нижчі пікові напруження, ніж стандартні пластини [8].

Водночас застосування подібної технології має певні обмеження. По-перше, виготовлення персоналізованих імплантів потребує високоточного комп'ютерного томографування, спеціалізованого програмного забезпечення для сегментації та доступу до виробництва, що може обмежувати її доступність у закладах із невеликими технічними ресурсами. По-друге, економічна ефективність виготовлення одноразових індивідуальних пластин потребує подальшого вивчення [9]. По-третє, наведений випадок відображає успішний результат в одного пацієнта; тому необхідні подальші проспективні дослідження з достатньою вибіркою для оцінки відтворюваності результатів і довгострокових функціональних наслідків.

Попри зазначені обмеження, цей клінічний приклад доповнює сучасну доказову базу на користь використання персоналізованих 3D-моделей та індивідуалізованих фіксаторів у лікуванні складних ушкоджень ключиці. Досягнуте точне анатомічне відновлення, скорочення часу операції та швидке функціональне відновлення підтверджують потенціал технології 3D-моделювання як перспективного напрямку реконструктивної травматології та реабілітаційного процесу.

Висновки. 1. 3D-друковані моделі допомагають у передопераційному плануванні, надаючи анатомічні копії, адаптовані до потреб пацієнта, що дозволяє точно попередньо контурувати пластини, скорочувати тривалість операції, покращувати адаптацію імплантів, особливо в ключицях через їх складну S-подібну форму та анатомічні варіації.

2. Використання фіксаторів, надрукованих на 3D-принтері, пов'язане з кращою конформацією імплантата, що потенційно пришвидшує консолідацію переломів, а також перспективно призводить до швидшого функціонального відновлення прилеглих суглобів.

3. Дослідження показують, що 3D-друк пластин покращує методику остеосинтезу при переломах ключиці та лопатки, що значно підвищує якість життя починаючи з раннього післяопераційного періоду.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Джерела фінансування. Не було використано зовнішніх джерел фінансування.

Внесок авторів. Цвях А. І. – ідея дослідження, аналіз та обговорення. Чайківський А. Я. – концепція дослідження, збір клінічного матеріалу. Обаранчук А. М. – дизайн дослідження, підготовка до друку. Господарський А. Я. – написання тексту, обробка матеріалу.

Перспективи подальших досліджень. Полягають у проведенні багатоцентрових порівняльних досліджень, які дозволять об'єктивно оцінити клінічні переваги пацієнтоспецифічних 3D-друкованих фіксаторів над стандартними пластинами, включно із впливом на швидкість зрощення, частоту ускладнень та функціональні результати. Важливим є також вивчення економічної доцільності застосування індивідуальних імплантів, а також удосконалення технологій автоматизованого проєктування та друку для покращення остеointegraції та впровадження мобільних рішень 3D-друку у військовій хірургії.

REFERENCES

- Liang H, Zhang H, Chen B. 3D printing technology combined with personalized plates for complex distal intra-articular fractures of the trimalleolar ankle. *Sci Rep.* 2023; 13:22667. DOI: 10.1038/s41598-023-49515-1.
- Li W. Personalized 3D-printed bone plates in fracture management: recent advances and future perspectives. *BME Horiz.* 2025; 3:202512. DOI: 10.70401/bmeh.2025.0005.
- Jarayabhand R, Jiamton C, Puncreobutr C, Lohwongwatana B, Apivatthakakul T, Fang C. Patient-specific 3D-printed metal plates for osteotomy and fracture fixation: an illustrative series with workflow and regulatory considerations. *Journal of Orthopaedic Surgery.* 2025; 33(4):1-10. DOI: 10.1177/10225536251356724.
- Long T, Tan L and Liu X. Three-dimensional printing in modern orthopedic trauma surgery: a comprehensive analysis of technical evolution and clinical translation. *Front. Med.* 2025; 12:1560909. DOI: 10.3389/fmed.2025.1560909.
- Kim H, Jung Y, Song HS. Plate prebending using a three-dimensional-printed model affords effective anatomical reduction in clavicular shaft fractures. *Clin Shoulder Elb.* 2023 Dec; 26(4):397-405. DOI: 10.5397/cise.2023.00339.
- Leroux T, Wasserstein D, Henry P. Rate of and risk factors for reoperations after open reduction and internal fixation of midshaft clavicle fractures: a population-based study in Ontario, Canada. *J Bone Joint Surg Am.* 2014; 96:1119-25. DOI: 10.2106/JBJS.M.00607.
- Zlowodzki M, Zelle BA, Cole PA, Jeray K, McKee MD, Evidence-Based Orthopaedic Trauma Working Group Treatment of acute midshaft clavicle fractures: systematic review of 2144 fractures: on behalf of the Evidence-Based Orthopaedic Trauma Working Group. *J Orthop Trauma.* 2005; 19:504-7. DOI: 10.1097/01.bot.0000172287.44278.ef.
- Van der Meijden OA, Gaskill TR, Millett PJ. Treatment of clavicle fractures: current concepts review. *J Shoulder Elbow Surg.* 2012; 21:423-9. DOI: 10.1016/j.jse.2011.08.053.
- Andrade-Silva FB, Kojima KE, Joeris A, Santos Silva J, Mattar

R., Jr. Single, superiorly placed reconstruction plate compared with flexible intramedullary nailing for midshaft clavicular

fractures: a prospective, randomized controlled trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2015; 97:620-6. DOI: 10.2106/JBJS.N.00497.

Отримано 10.10.2025

Електронна адреса для листування: tsvyahai@tdmu.edu.ua

A. I. TSVYAKH¹, A. Ya. CHAIKIVSKYJ², A. M. OBARANCHUK², A. YA. HOSPODARSKYY¹

¹I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, Ukraine

²Municipal Non-Profit Enterprize "Ternopil City Municipal Emergency Hospital", Ternopil, Ukraine

3D RECONSTRUCTION OF MULTISTRUCTURAL INJURIES OF THE UPPER SHOULDER GIRDLE FOLLOWING GUNSHOT TRAUMA

The aim of the work: to present a clinical case illustrating the use of virtual 3D modeling and an individualized locking compression plate (LCP) in the surgical management of a comminuted gunshot fracture of the clavicle with bone loss.

Materials and Methods. A 42-year-old male soldier sustained a gunshot fracture of the right clavicle with associated scapular and rib injuries. Preoperative computed tomography was used to create a mirrored 3D model of the contralateral clavicle, allowing the design of a customized titanium Ti-6Al-4V ELI LCP plate. A bone defect of approximately 2 cm was reconstructed using an autologous iliac crest graft modeled on a 3D template.

Results. The use of a patient-specific plate provided anatomical restoration of the clavicular contour and stable fixation without intraoperative bending. The surgical time was 85 minutes, blood loss did not exceed 200 ml, and wound healing occurred by primary intention. Radiographic evaluation at four weeks confirmed correct implant position and bone alignment. At three months, complete bone union and full functional recovery of the shoulder girdle were achieved.

Conclusions. This case demonstrates that patient-specific 3D-modeled implants enable accurate anatomical reconstruction, mechanical stability, and rapid rehabilitation in complex post-traumatic clavicular injuries.

Key words: 3D modeling; polystructural damage; clavicle fracture; gunshot injury; patient-specific implant; locking compression plate.

Відомості про авторів

Цвях А. І. – доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри травматології та ортопедії з військово-польовою хірургією закладу вищої освіти, Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, Тернопіль, Україна, e-mail: tsvyahai@tdmu.edu.ua.

Чайківський А. Я. – лікар-травматолог КНП «Тернопільська міська комунальна лікарня швидкої допомоги», Тернопіль, Україна, e-mail: chajka1989@gmail.com.

Обаранчук А. М. – лікар-травматолог КНП «Тернопільська міська комунальна лікарня швидкої допомоги», Тернопіль, Україна, e-mail: ortopedanrij82@gmail.com.

Господарський А. Я. – кандидат медичних наук, доцент кафедри загальної хірургії закладу вищої освіти, Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, Тернопіль, Україна, e-mail: hospodarsky@tdmu.edu.ua.

Information about the authors

Tsvyakh A. I. – DSc (Medicine), Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics with Military Field Surgery, I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, Ukraine, e-mail: tsvyahai@tdmu.edu.ua.

Chaikivskyj A. Ya. – Traumatologist, Municipal Non-Profit Enterprize "Ternopil City Municipal Emergency Hospital", Ternopil, Ukraine, e-mail: chajka1989@gmail.com.

Obaranchuk A. M. – Traumatologist, Municipal Non-Profit Enterprize "Ternopil City Municipal Emergency Hospital", Ternopil, Ukraine, e-mail: ortopedanrij82@gmail.com.

Hospodarsky A. Ya. – PhD (Medicine), Associate Professor of the Department of General Surgery, I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, Ukraine, e-mail: hospodarsky@tdmu.edu.ua.