

## МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ М'ЯЗІВ ЛОПАТКИ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЗГИНАННІ ВЕРХНЬОЇ КІНЦІВКИ В ПЛЕЧОВОМУ СУГЛОБІ

Долгополов О.В.<sup>1</sup>, Безрученко С.О.<sup>1</sup>, Занько І.С.<sup>1</sup>  
Суворов В.Л.<sup>1</sup>, Карпінська О.Д.<sup>2</sup>, Карпінський М.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ

<sup>2</sup>ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка  
НАМН України», м. Харків

**Вступ.** Поєднанні переломи лопатки та ключиці є рідкісною травмою, яка зазвичай виникає внаслідок високоенергетичного механізму, зокрема вогнепального або мінно-вибухового поранення у пацієнтів із бойовою травмою і становить 3%-5% усіх переломів плечового поясу та 1% від загальної кількості переломів у цивільних пацієнтів [1]. Вперше дана комбінація переломів була описана Ganz та Noesberger у 1975 році, і для її позначення було запропоновано термін «флотуюче плече» (floating shoulder) [2]. В 1993 році Goss та ін. запровадили термін «верхнього плечового підвісного комплексу» (superior suspensory shoulder complex (SSSC)), який включає в себе кісткові та м'якотканинні структури, які забезпечують біомеханіку плечового суглоба, зокрема: гленоїд лопатки, дзьобоподібний відросток лопатки, дзьобоподібно-ключичні зв'язки, надплечово-ключичний суглоб, надплечовий кінець ключиці та надплечовий відросток лопатки [3]. Згодом поняття «флотуюче плече» було відокремлено і стало називатись «подвійне пошкодження» верхнього плечового підвісного комплексу («double disruption» of the superior suspensory shoulder complex (SSSC)) [4]. Обидва ці анатомічні утворення (лопатка і ключиця) відіграють ключову роль у стабілізації і передачі навантажень від верхньої кінцівки до тулуба. Ключиця забезпечує зв'язок між грудним скелетом і лопаткою, підтримуючи правильне положення останньої, тоді як лопатка є основою для прикріплення численних м'язів, що забезпечують рухи плечового суглоба. Підняття руки передбачає рух як у гленоплечовому суглобі, так і в лопатково-грудному зчленуванні. При поєднаному пошкодженні структур цих суглобів, порушується як цілісність кісткового кільця надпліччя, так і м'язово-зв'язковий баланс. Це може призводити до серйозних обмежень у русі верхньої кінцівки, включаючи зниження можливості відведення, згинання, обертання у плечовому суглобі, а

також до асиметрії плечового поясу. Механізми компенсації з боку м'язів-антагоністів і стабілізаторів стають неефективними, що ускладнює функціональне відновлення. Особливо вираженими є порушення координації між рухами лопатки та плечової кістки (так званий *scapulohumeral rhythm*), що додатково посилює дисфункцію, а лікування травм такого типу вже багато років є предметом дискусій, і наразі не існує єдиної думки щодо оптимального підходу до лікування.

**Мета роботи.** Визначити величину сили та крутних моментів, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки та ключиці при згинанні руки.

**Матеріали і методи.** Моделювання проводили в пакеті OpenSim [5]— відкритій платформі, яка розроблена в Центрі біомедичних обчислень НІН Стенфордського університету для м'язово-скелетного моделювання, яка дозволяє будувати цифрові моделі людського тіла, відтворювати рухи та оцінювати внутрішні біомеханічні параметри такі як м'язові сили, реактивні навантаження в суглобах та інше.

Базова модель для моделі DAS3 - тривимірна модель плеча та верхньої кінцівки для моделювання динаміки руки в реальному часі, включаючи незалежний м'язовий контроль лопатки та ключиці [6].

Аналізували силу та крутний момент, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки при згинанні (підйомі руки) вперед на 90° [7].

Проводили аналіз роботи наступних м'язів:

**Mm. Rhomboideus.** Група глибоких власних м'язів плеча, які разом з груднинно-ключично-соскоподібним, трапецієподібним, грудним м'язами, найширшим м'язом спини і переднім зубчастим м'язом утворюють плечовий пояс. М'язи відводять, піднімають і обертають лопатку, розгинають медіальний край лопатки, утримуючи її в положенні на задній грудній стінці.

**Trapezius scapularis та clavicularis.** Трапецієподібний м'яз має три частини. Верхня підтримує руку; середня - втягує лопатку, нижня бере участь у медіальному повороті й притисканні лопатки.

**Serratus anterior (upper).** Великий, плоский, зубчастий м'яз, розташований на бічній стінці грудної клітки, під лопаткою. Основні функції: витягує лопатку вперед, від хребта, що необхідно для таких рухів, як віджимання, кидання і піднімання рук; допомагає обертати лопатку вгору, що дозволяє піднімати руку вище 90° та утримує лопатку притиснутою до грудної клітки, запобігаючи їй відшаруванню (так звана "крилоподібна лопатка").

Levator scapulae. Функція підіймача лопатки полягає в піднятті лопатки і нахилі порожнини гленоїду донизу шляхом обертання лопатки донизу.

На графіках крутних моментів враховуємо модульні значення. Крутні моменти враховують напрямок дії сили, і при зростанні від'ємних значень це не зниження моменту, а зміна напрямку дії [8, 9].

**Результати.** При підйомі руки вперед до  $90^\circ$  біомеханіка плечового поясу включає складну взаємодію між плечовим (гленогумеральним), лопаточно-грудним (скапулоторакальним) та іншими суглобами, з акцентом на рух лопатки, який є ключовим для забезпечення повного діапазону руху. [10].

При підйомі руки вперед до  $90^\circ$  відбувається комбінація рухів у кількох суглобах: плечовий суглоб (гленоїд) забезпечує флексію плечової кістки; ключично-грудинний комплекс дозволяє рухи лопатки відносно грудної клітки та груднинно-ключичний та надплечово-ключичний суглоби забезпечують рух ключиці, що сприяє позиціонуванню лопатки. Для забезпечення плавного руху плеча співвідношення між рухом гленогумерального суглоба та лопатки становить приблизно 2:1 (скапулогумеральний ритм). Наприклад, на кожні  $2^\circ$  флексії в гленогумеральному суглобі припадає  $1^\circ$  руху лопатки [11]

При флексії руки до  $90^\circ$  лопатка виконує кілька типів рухів у скапулоторакальному комплексі. Верхня ротація – нижній кут лопатки зміщується латерально та вгору, а верхній кут – медіально та вниз приблизно на кут  $20\text{--}30^\circ$  (залежно від індивідуальних особливостей). Це основний рух, який дозволяє акроміальному відростку лопатки піднятися та уникнути імпінджменту (затискання) структур в субакроміальному просторі. Задній нахил – нижній кут лопатки дещо відхиляється назад (постеріорно) на кут до  $10\text{--}15^\circ$ , що допомагає підтримувати простір у субакроміальному просторі. Латеральне зміщення - лопатка злегка зміщується вперед і латерально навколо грудної клітки, адаптуючись до руху руки вперед. Ці не значні рухи забезпечують оптимальне позиціонування гленоїдальної порожнини для підтримки плечової кістки та максимізації діапазону руху.

Рухи лопатки контролюються кількома ключовими м'язами. Верхній пучок трапецієподібного м'яза сприяє верхній ротації та підйому лопатки. Нижній пучок трапецієподібного м'яза стабілізує нижній кут лопатки та сприяє верхній ротації. Передній зубчастий м'яз (*serratus anterior*): основний м'яз для верхньої ротації та латерального зміщення лопатки, утримує її біля грудної клітки. Ромбоподібні м'язи

та середній пучок трапецієподібного м'яза стабілізують лопатку, запобігаючи надмірному латеральному зміщенню. Грудний малий м'яз (*pectoralis minor*) може сприяти задньому нахилу та стабілізації. Ключиця також відіграє важливу роль. У груднинно-ключичному суглобі відбувається підйом (*elevation*) і задня ротація ключиці, що дозволяє лопатці рухатися вгору. В надплечово-ключичному суглобі відбувається незначна ротація, що сприяє адаптації акроміона до руху лопатки.

**Trapezius clavicular** (верхній пучок трапецієподібного м'яза) бере початок від зовнішнього потиличного горбка, медіальної третини верхньої шийної лінії потиличної кістки та зв'язки *puchae*, прикріплюючись до заднього краю латеральної третини ключиці. М. *Trapezius clavicular* відіграє важливу роль у флексії руки, сприяючи руху лопатки. Він забезпечує верхню ротацію та підйом лопатки та стабілізацію лопатки. Флексія руки, особливо до  $90^\circ$ , передбачає підйом руки вперед, що вимагає скоординованого руху плечового (гленогумерального) суглоба та лопаточно-грудного (скапулоторакального) комплексу. М'яз сприяє ритму плечолопаткового суглоба через прикріплення до ключиці та лопатки.

У результаті моделювання активності верхнього пучка трапецієподібного м'яза під час флексії верхньої кінцівки встановлено, що до кута  $30\text{--}35^\circ$  м'язова сила залишається практично незмінною в межах  $10,75\text{--}11,0$  Н, що свідчить про її переважну стабілізуючу функцію на початкових етапах підйому кінцівки. Проте зі збільшенням кута згинання відзначається стрімке зростання необхідного зусилля – до  $12,75$  Н при досягненні  $90^\circ$ . Основний біомеханічний вплив на м'яз зумовлений рухом ключиці, однак під час флексії її амплітуда обмежена, тому й зміна м'язового зусилля залишається незначною.

Крутний момент, що створюється верхнім пучком трапецієподібного м'яза (*m. trapezius, pars clavicularis*), змінюється у відносно вузькому діапазоні — від  $0,05$  Н·м до  $0,3$  Н·м, причому його динаміка більше залежить від напрямку руху, ніж від абсолютної сили.

**M. Trapezius scapularis** (середній пучок трапецієподібного м'яза) виконує стабілізаційну та контрольну функцію під час флексії руки до  $90^\circ$ . Середні волокна м'яза йдуть до медіального краю акроміального відростка та верхнього краю ості лопатки. При флексії плеча до  $90^\circ$  середній пучок трапецієподібного м'яза не є основним рушієм руху, але є критично важливим стабілізатором. Він забезпечує кінематичну синхронізацію між рухом плечової кістки та лопатки. У фазі від  $60^\circ$  до  $90^\circ$  флексії середній

пучок сприяє ретракції лопатки, зберігаючи її в оптимальному положенні при русі руки в сагітальній площині.

Виходячи з результатів моделювання, при нульовому положенні руки (рука вздовж тіла) лопатка намагається відхилитися від задньої поверхні ребер, тому сила *m. Trapezius scapularis* розвиває силу у межах 600 Н для утримання лопатки на місці. Але при підйомі руки до кута 60° лопатка природньо притягається до ребер. При подальшій флексії відбувається протракція лопатки, тому для її стабілізації збільшується сила м'яза, що і відображено на діаграмі. Через те, що м'яз впродовж всього циклу згинання руки працює в одному напрямку на скорочення, крутний момент має вигляд плавно спадаючої кривої.

**М'яз *rhomboideus*** (ромбоподібний м'яз). Його основні функції полягають у приведенні лопатки до хребта, піднімання медіального краю лопатки, фіксація лопатки до грудної стінки. При підйомі прямої руки вперед до 90° лопатка обертається латерально (вгору), при цьому активуються *m. trapezius* та *m. serratus anterior*. Для стабілізації лопатки, *rhomboideus* тягне лопатку медіально та вниз, тобто сприяє медіальній ротації. Стабілізатор лопатки – утримує її біля хребта, особливо при статичному навантаженні.

За даними моделювання при згинанні плеча до кута 50-60° сила ромбоподібного м'яза знаходиться майже на одному рівні, помірно змінюючись від 0 Н при опущеній кінцівці до 70 Н. На цьому інтервалі флексії кінцівки рух лопатки не значний, що і показує графік. Але при подальшому згинанні, після 60° спостерігається наростання сили ромбоподібного м'яза з максимумом у 350 Н при куті 90°. Саме при флексії кінцівки більше 60°, як було сказано вище, починаються активні рухи лопатки, і відповідно, зростає сила м'язів, відповідальних за її стабілізацію. Крутний момент, який створює *m. Rhomboideus* (рис. 3, б) починає стрімко зростати саме після флексії 60°.

**М. *serratus anterior*** (передній зубчастий м'яз). *Serratus anterior* (upper) починається від верхніх ребер (1–2) і тягнеться до верхнього кута лопатки. Фіксує верхній кут лопатки на початку руху, тобто здійснює початкову стабілізацію. *Serratus anterior* (lower) починається від нижніх ребер (6–9) до нижнього кута лопатки. *M. serratus anterior* фіксує лопатку до грудної клітки, втягує лопатку латерально (латеротракція) та повертає лопатку догори (латероротація) – критично важливо для підняття руки понад більше 60°.

Збільшення сили верхньої частини переднього зубчастого м'яза, необхідної для підтримання стабільності лопатки, починається з кута

флексії більше  $50^\circ$  (рис. 4, а). Зубчастий характер збільшення сили пов'язано з поступовим залученням пучків зі збільшенням кута згинання. Щодо зміни крутного моменту *m. Serratus anterior* (upper), до кута  $30^\circ$  м'яз створює мінімальний момент, який залежить виключно від зміни координати скорочення, далі до  $60^\circ$  спостерігається включення м'яза в роботу із стабілізації, і момент зростає, при подальшій флексії, активна ротація зростає, але крутний момент, майже залишається без змін. На цьому відрізку контроль стабілізації передається *trapezius*.

*Upper serratus anterior* не створює значного крутного моменту самостійно при флексії плеча. Його функція полягає в утриманні лопатки стабільною, щоб не виникло паразитних ротацій. В реальності, основне джерело крутного моменту для латероротації лопатки при підйомі руки — нижня частина *serratus anterior* у поєднанні з верхньою та нижньою трапецією.

На початку руху кінцівки, сила *Serratus anterior* (lower) направлена на утримання нижнього кінця лопатки, але при флексії кінцівки, лопатку допомагають утримувати інші м'язи, тому необхідна сила зменшується.

Аналогічно розвивається і крутний момент, тобто максимальний при опущеній кінцівці, і майже близький до нульового при згинання на  $90^\circ$ . На початку флексії ( $0-30^\circ$ ) нижня частина *Serratus anterior* дуже активна. Вона забезпечує латероротацію лопатки, готує суглоб до подальшого підйому руки. В цьому положенні крутний момент найбільший через значне навантаження на м'яз. При подальшій флексії (від  $30^\circ$  до  $60^\circ$ ) частка моменту знижується, до руху більше долучаються інші м'язи (трапеція, дельтоподібний). *m. Serratus anterior* (lower) все ще працює, але вже не є основним рушієм. Після  $70^\circ$  м'яз стабілізує, але майже не створює крутного моменту, лопатка вже достатньо повернута догори, м'яз утримує її позицію, спостерігається ізометричне напруження, менше сили.

Розглянемо роботу **Levator scapulae**, м'яза, який підіймає лопатку вгору та медіально (елеватор і медіальний ротаційний м'яз), а також Нахиляє шию при фіксованій лопатці. При початку підйому руки *levator scapulae* допомагає утримати лопатку стабільною. М'яз починається від відростків C1-C4 та йде до верхнього медіального краю лопатки.

До  $30-40^\circ$  згинання кінцівки, лопатка майже не ротується, *Levator scapulae* стабілізує верхній кут лопатки, його сила мінімальна.

Але після 50–60° флексії починається активна латероротація лопатки, до якої Levator scapulae антагоністичний, для утримання положення верхнього кута, м'яз створює зростаючий момент, а отже, і зростає сила натягу сухожилля. При куті згинання до 85–90° m. Levator не ротує лопатку самостійно, а активується для балансування тяги від serratus anterior (lower) і нижньої трапеції. Його дія — це ізометрична стабілізація, щоб не допустити надмірного нахилу або крутіння лопатки.

**Обговорення.** Під час флексії плеча до 90°, лопатка виконує латероротацію, підлаштовуючи свою позицію до руху плечової кістки. Це критично важливо для збереження підакроміального простору, запобігання імпінджменту й забезпечення плавного руху. Ми описали роботу основних стабілізаторів лопатки при згинанні руки до 90°.

Serratus anterior (lower) — головний ініціатор латероротації лопатки при флексії плеча. Його крутний момент найвищий у перших 20–30°, що критично для «розгону» руху. До 60° флексії активність Serratus anterior (lower) є максимальною, саме тут формується найбільший крутний момент, як показує графік (рис. 5, а, б). Після 60°: функція стабілізації переходить до трапеції, serratus працює менш активно (ізометрично).

Основна силова пара для стабільного руху лопатки при флексії складається з Serratus anterior (lower) та Trapezius (upper/lower), які забезпечують контрольовану латероротацію. Саме ці м'язи мають розвивають найбільші моменти при русі руки вперед - з Serratus anterior (lower) на початку руху, Trapezius (upper/lower) – при куті близькому до 90°.

Інші м'язи (rhomboideus, levator scapulae) — модулюють і обмежують надмірні рухи, утримуючи лопатку стабільною.

Подвійний перелом ключиці й лопатки призводить до порушення кінематичного ланцюга плечового поясу.

Порушення стабільності плечового поясу. Ключиця через груднинно-ключичний суглоб є єдиним кістковим зв'язком верхньої кінцівки з тулубом. При її переломі рука "від'єднується" від аксіального скелета.

Якщо додається перелом лопатки, то порушується фіксація руки до грудної клітки через м'язи, що призводить до зростання нестабільності.

Втрата координації лопатково-гумерального ритму. Як було сказано вище, на кожні 2° руху плеча припадає 1° ротації лопатки. При

порушенні цілісності ключиці/лопатки втрачається обертальний контроль, тоді рука не може підніматися вище  $\sim 60\text{--}90^\circ$ , з'являється дискінезія лопатки (скапулярна нестабільність) [12].

Відповідно, перелом ключиці і лопатки призводить до обмеження флексії. Rhomboideus, levator scapulae, serratus anterior, trapezius — втрачають опору для тяги, адже лопатка або/та ключиця нестабільні. Виникає компенсаторне перенапруження шийних м'язів та контралатерального плечового поясу.

Флексія знижується знижуються до  $\sim 60\text{--}70^\circ$  виключно за рахунок м'язів обертальної манжети, рухи тулуба провокують зміщення лопатки [13]. До цього додається біль, при будь-яких рухах, взагалі.

**Висновки.** За дами моделювання визначено, що основними м'язами-стабілізаторами лопатки при флексії плеча є Serratus anterior (lower) і Trapezius. Саме ці м'язи створюють максимальні крутні моменти при русі руки вперед. Виходячи з анатомічного положення цих м'язів – безпосереднього кріплення до найбільш рухових ділянок лопатки, при переломі ці м'язи втрачають опору для створення моменту, що призводить до значного обмеження рухів верхньої кінцівки та порушення стабільності лопатки.

#### Література

1. Nguyen, M. K., Nguyen, V. H., Le, H. G. K., & Cao, D. B. (2024). Multiple disruptions of superior suspensory shoulder complex: A case report. *International journal of surgery case reports*, 124, 110385. <https://doi.org/10.1016/j.ijscr.2024.110385>
2. Hess, F., Zettl, R., Smolen, D., & Knoth, C. (2019). Decision-making for complex scapula and ipsilateral clavicle fractures: a review. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society*, 45(2), 221–230. <https://doi.org/10.1007/s00068-018-0946-3>
3. Jaën M, Sayer L, Fornaciari P. Triple Disruption of the Superior Shoulder Suspensory Complex - Review and Surgical Technique. *J Orthop Case Rep*. 2023 Jun;13(6):121-126. doi: 10.13107/jocr.2023.v13.i06.3720. PMID: 37398540; PMCID: PMC10308973
4. Bartoniček, J., Tuček, M., & Naňka, O. (2018). Floating Shoulder: Myths and Reality. *JBJS reviews*, 6(10), e5. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.17.00198>
5. Delp, S.L., Anderson, F.C., Arnold, A.S., Loan, P., Habib, A., John, C.T., Guendelman, E. & Thelen, D.G. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Trans Biomed Eng*: 54(11):1940-1950. DOI: 10.1109/TBME.2007.901024
6. Chadwick, E., Blana, D., Kirsch, R., & Bogert, A. van den. (2014). Real-Time Simulation of Three-Dimensional Shoulder Girdle and Arm Dynamics. *IEEE*

Transactions on Biomedical Engineering, 61(7), 1947-1956. doi:10.1109/TBME.2014.2309727 (2014)

7. Nordin M, Frankel VH, editors. *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health; 2012. p.470

8. Hamm K. Biomechanics of Human Movement. E-book: <https://pressbooks.bccampus.ca/humanbiomechanics/>

9. Тяжелов ОА, Карпінська ОД, Рикун МД, Браніцький ОЮ. Вплив зміни довжини компонентів м'язово-сухожилкового елемента м'язів-згиначів ліктьового суглоба на ізометричну силу та крутний момент суглоба. Ортопедія, травматологія та протезування. 2023; 4 (634): 48-55. DOI: 10.15674/0030-59872023448-55

10. Miniato MA, Anand P, Varacallo MA. Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Shoulder. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536933>

11. Crosbie J, Kilbreath SL, Hollmann L, York S. Scapulohumeral rhythm and associated spinal motion. *Clinical biomechanics*. 2008 Feb 1;23(2):184-92.

12. [https://www.physio-pedia.com/Scapulohumeral\\_Rhythm](https://www.physio-pedia.com/Scapulohumeral_Rhythm)

13. Кравченко Д., Страфун О., Суворов В., Карпінська О., Карпінський М. Моделювання роботи м'язів при згинанні верхньої кінцівки в плечовому суглобі. *ТРАВМА*. 2025; 26 (3): 136-144, doi:10.22141/1608-1706.3.26.2025.1014