

# МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ М'ЯЗИВ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ ЗГИНАННЯ ВЕРХНЬОЇ КІНЦІВКИ В ПЛЕЧОВОМУ СУГЛОБІ

Кравченко Д.Д.<sup>1</sup>, Страфун О.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

**Ключові слова:** плечовий суглоб, згинання, м'язи, ізометрична сила, момент сили.

**Вступ.** Рухи верхніх кінцівок, зокрема згинання та відведення руки, відіграють ключову роль у повсякденному житті людини, забезпечуючи широкий спектр активності — від побутових дій до складних фізичних навантажень [1]. Ці рухи реалізуються завдяки скоординованій роботі м'язових груп, таких як біцепс, трицепс, дельтоподібний м'яз та м'язи ротаторної манжети, які взаємодіють із біомеханічною системою плечового суглоба [2].

Ендопротезування плечового суглоба (артропластика) проводиться для заміни пошкоджених суглобових поверхонь (головки плечової кістки та/або суглобової западини лопатки) штучними компонентами [3]. Процедура ендопротезування часто застосовується при переломах або масивних розривах м'язів ротаторної манжети, коли консервативне лікування неефективне. У випадках, коли неможливо застосовувати анатомічне ендопротезування плечового суглобу (ротаторна артропатія плечового суглобу, псевдопараліч плеча, багатуламкові переломи проксимальної ділянки плечової кістки у пацієнтів похилого віку) широко використовується реверсивне ендопротезування [4]. Для вибору коректного хірургічного втручання необхідно розуміти анатомію та функцію прилеглих тканин, зокрема м'язів ротаторної манжети: 1) надостьового (m. supraspinatus), 2) підостьового (m. infraspinatus), 3) малого круглого (m. teres minor)? 4) підлопаткового (m. subscapularis) [5]. Також необхідно брати до уваги структуру дельтоподібного м'яза (m. deltoideus), без функціонування якого будь-яке ендопротезування не має сенсу [6].

Розуміння функцій цих м'язів також має значення для розробки післяопераційних реабілітаційних програм в контексті ортопедичних втручань, зокрема ендопротезування плечового суглоба. При заміщенні плечового суглоба важливо враховувати внесок м'язів, відповідальних

за згинання та відведення плеча, оскільки їхня функція суттєво впливає на стабільність протеза, діапазон рухів і загальну ефективність відновлення [7].

Сучасні інструменти біомеханічного моделювання, такі як програмне забезпечення OpenSim [8.], дозволяють досліджувати м'язову динаміку та кінематику рухів у віртуальному середовищі. У цій роботі ми зосереджуємося на моделюванні згинання руки, аналізуючи активність ключових м'язів, що забезпечують ці рухи.

**Мета:** оцінити силовий внесок окремих м'язових груп при згинання верхньої кінцівки в плечовому суглобі для подальшого застосування в біомеханіці та клінічній практиці.

**Матеріали і методи.** В основі моделі лежить модель DAS3, яка є компонентом проекту Dynamic Arm Simulator, використовується для симуляції в реальному часі біомеханіки плечового поясу та верхньої кінцівки. Цей симулятор був створений в рамках проекту NIH "Контрольована мозком гібридна функціональна електрична стимуляція" під керівництвом доктора Роберта Ф. Кірша з Case Western Reserve University. Фундаментальні параметри та математичне підґрунтя моделі описані в публікації Chadwick E. та співавторів [9].

Дана модель дозволяє досліджувати рухи в суглобах плечового поясу. В структуру моделі, застосованої для моделювання, входять 6 суглобових з'єднань: надплечово-ключичне (*articulatio acromioclavicularis* - ac), грудинно-ключичне (*articulatio sternoclavicularis* - sc), плечове (*articulatio glenohumeralis* - gh), плечо-ліктьове (*articulatio humeroulnaris* – hu), плечо-променево (*articulatio humeroradialis* – hr) та променево-зап'ясткове (*articulatio radiocarpalis* – rc). Загалом модель містить 138 м'язів.

Для вивчення згинання верхньої кінцівки нам необхідно змодельовати рухи у плечовому суглобі (далі GH). В моделі згинання здійснюється зміна кута в GH по осі Z. Виходячи з особливості моделі, згинання верхньої кінцівки вивчається від 0° до 90°. Розглядаємо рух верхньої кінцівки без навантаження (Passive) та при згинанні з вагою 2 кг.

У плечовому суглобі сила м'язів забезпечує як рух, так і стабільність. Ротаторна манжета відіграє важливу роль у стабілізації головки плечової кістки в суглобовій западині лопатки під час рухів. Дельтоподібний м'яз (*m. deltoideus*) анатомічно поділяється на три основні порції (або частини), в функції згинання задіяна тільки передня порція - *pars clavicularis*.

**Результати.** Розглянемо зміну сили м'язів при згинання верхньої кінцівки до 90°.

Дельтоподібний м'яз (*m. deltoideus*) – це великий м'яз трикутної форми, який лежить над плечовим суглобом (GH) і надає плечу округлий контур. анатомічно поділяється на три основні порції (або частини), які мають різні функції завдяки своїм точкам прикріплення та напрямку волокон [10].

**Передня порція (*pars clavicularis*).** Розташована в передній частині м'яза, бере початок від бічної третини ключиці. Основна функція: згинання плеча (підняття руки вперед) і внутрішня ротація.

**Середня порція (*pars acromialis*).** Знаходиться в середній частині, бере початок від акроміону лопатки. Основна функція: відведення плеча (підняття руки вбік), особливо активна в діапазоні від 15° до 90°.

**Задня порція (*pars spinalis*).** Розташована в задній частині, бере початок від остистого відростка лопатки. Основна функція: розгинання плеча (відведення руки назад) і зовнішня ротація.

Кожна частина може працювати незалежно або в синергії з іншими залежно від типу руху плеча.

Напрямок руху верхньої кінцівки (вперед, у бік чи назад) залежить від положення голівки плечової кістки у суглобі. Тобто кут її положення відносно базового, буде визначати напрямок руху кінцівки.

Розглянемо силу, яку необхідно розвивати передній порції **дельтоподібного** м'язу для згинання руки в плечовому суглобі. Враховуючи те, що верхня кінцівка має певну вагу, то для її згинання м'яз повинен розвинути силу для його виконання. При підйомі руки з вагою (2 кг), відповідні м'язи повинні розвинути додаткові зусилля. Розглянемо яку силу розвивають відповідні групи дельтовидного м'язу.

Передня порція дельтоподібного м'яза є основним агоністом при згинанні плеча (флексії), тобто піднятті руки вперед у сагітальній площині. Його активність особливо виражена в діапазоні від 0° до 90° згинання, коли рука піднімається від вертикального положення до горизонтального. *Pars clavicularis* працює разом із великим грудним м'язом (*m. pectoralis major, pars clavicularis*), двоголовим м'язом плеча (*m. biceps brachii*) та клювоплечовим м'язом (*m. coracobrachialis*), підсилюючи згинання. Передня порція генерує меншу силу порівняно з середньою (*pars acromialis*), але її внесок значний у початковій фазі згинання (0°–60°).

Крутний момент, який розвиває **m. deltoideus, pars clavicularis** при згинанні руки, залежить від сили м'яза, довжини важеля та кута прикладання сили. У початковій фазі згинання крутний момент зростає (від 0° до 60°), оскільки рука долає силу тяжіння, а передня порція активно скорочується. Максимальна ефективність досягається приблизно при 30°–60°, коли довжина волокон м'яза оптимальна для генерації сили. Крутний момент досягає піку при 90°, коли важіль максимальний, а сила тяжіння чинить найбільший опір. Однак у цій фазі *pars clavicularis* може частково поступатися роллю іншим синергістам (наприклад, *m. pectoralis major*).

При згинанні плеча (флексії) *m. deltoideus, pars acromialis* відіграє роль допоміжного м'яза (синергіста), а не основного агоніста. Основну силу забезпечує передня порція (*pars clavicularis*), але середня порція включається, якщо рух потребує додаткової стабілізації як це видно при згинанні з вагою. Сила м'яза зростає у 2,5 рази. Активність м'яза менш виражена у сагітальній площині, але сприяє крутному моменту, особливо при кутах 60°–90°, коли рука наближається до горизонтального положення. Крутний момент зростає пропорційно куту. *m. deltoideus, pars acromialis* має більшу ізометричну силу, тому на діаграмі ми бачимо трохи більший внесок в розвиток крутного моменту, ніж передньої порції, хоча він більше направлений на стабілізацію плеча, ніж на сам рух.

Задня порція дельтоподібного м'яза (*m. deltoideus, pars spinalis*) практично не приймає участь в згинанні, а більше стабілізує суглоб.

При згинанні плеча *musculus deltoideus, pars spinalis* (задня порція дельтоподібного м'яза) діє як антагоніст, а не агоніст чи синергіст. Її основна функція — розгинання та зовнішня ротація, тому під час згинання (руху вперед) вона пасивно розтягується, протидіючи передній порції (*pars clavicularis*), яка є головним рушієм. М'яз генерує мінімальну активну силу в цьому русі, але може чинити опір через тонус чи еластичність волокон. Крутний момент, який він створює, спрямований проти згинання. В пасивних рухах (флексії) плеча спостерігаємо практично пряму стабільну траєкторію як сили, так і крутного моменту. Але, при згинанні руки з вагою крутний момент *musculus deltoideus, pars spinalis* зростає через збільшення зовнішнього навантаження - вага в руці додає додатковий момент сили, спрямований вниз (за рахунок гравітації), який протидіє згинанню. *Pars spinalis*, як антагоніст, активніше включається, щоб стабілізувати суглоб або уповільнити рух. Для того, щоб протистояти вазі, задня порція генерує

більшу силу ( $F$ ), ніж при згинанні без навантаження через те, що вага, розташована дистальніше від суглоба (у долоні), подовжує важіль, що прямо пропорційно збільшує крутний момент. Крутний момент зростає через те, що вага підсилює опір, змушуючи задню порцію працювати інтенсивніше як стабілізатор чи гальмо, а довший важіль і більша сила підсилюють ефект.

**Анатомія та функція ротаторної манжети.** Ротаторна манжета плеча складається з чотирьох м'язів: надостьового (*m. supraspinatus*), підостьового (*m. infraspinatus*), малого круглого (*m. teres minor*) і підлопаткового (*m. subscapularis*). Ці м'язи відіграють подвійну роль: вони забезпечують обертальні рухи плеча та стабілізують головку плечової кістки в суглобовій западині лопатки. Ротаторна манжета активно працює для стабілізації суглоба протягом усього руху.

Згинання руки в плечовому суглобі на  $90^\circ$  — це рух, коли рука піднімається вперед від вертикального положення до горизонтального. Цей рух можна умовно поділити на дві фази: початкова фаза згинання, де активність м'язів манжети та інших агоністів має свої особливості — від  $0^\circ$  до  $60^\circ$  та завершальна фаза, де відбувається перерозподіл навантаження між м'язами від  $60^\circ$  до  $90^\circ$ .

У початковій фазі згинання (до  $60^\circ$ ) основну роль відіграють м'язи, які здатні ефективно генерувати силу при менших кутах. Це надостьовий м'яз (*m. supraspinatus*) - активний на початку руху [11]. Згинання не є його основною функцією, він допомагає утримувати головку плечової кістки в суглобовій западині, коли рука починає рухатися вперед. Його внесок зменшується після  $60^\circ$ , коли кут прикладання сили стає менш вигідним. Підлопатковий м'яз (*m. subscapularis*) - внутрішній ротатор, він стабілізує суглоб і може брати участь у згинанні, особливо якщо рух супроводжується легкою внутрішньою ротацією. Його активність також знижується після  $60^\circ$  через зміну кута важеля [12].

У цій фазі крутний момент у плечовому суглобі зростає пропорційно куту згинання, оскільки довжина важеля (відстань від осі обертання до точки прикладання сили) збільшується. Проте м'язи манжети працюють переважно для стабілізації, а не для створення основного крутного моменту.

Розглянемо як представлено в моделі робота надостьового м'язу (*m. supraspinatus*). Як показало моделювання, сила і крутний момент ***m. supraspinatus*** (надостьового м'язу) зменшуються при згинанні плеча, особливо після  $60^\circ$ . Це пов'язано, з тим, що згинання не є функцією

надостьового м'язу, при флексії його внесок мінімальний, і після 60° він поступається іншим м'язам (наприклад, *m. deltoideus, pars clavicularis*). Хоча довжина важеля (*d* – довжина м'яза) зростає при згинанні до 90°, для *supraspinatus* це менш значуще, через те, що його точка прикріплення (великий горбок плечової кістки) не оптимізує момент у сагітальній площині. Отже, після 60° сила і момент зменшуються через субоптимальну довжину м'яза та несприятливий кут, що знижує його ефективність при згинанні.

Сила *m. subscapularis* при пасивному згинанні не генерує значної сили, оскільки його основна роль внутрішня ротація та стабілізація, а не флексія. Сила залишається низькою і стабільною, залежною лише від тонусу чи еластичності м'яза. Відповідно і крутний момент при пасивному згинанні зростає, але повільно через не значне збільшення кута дії сили м'язів. При згинанні з вагою спостерігаємо трикратне зростання сили м'яза для стабілізації суглоба, що і викликає значне збільшення крутного моменту до кута згинання 60°. Після 60° кут стає менш оптимальним, і момент знижується. При згинанні плеча з вагою, *m. subscapularis* активніше включається для запобігання передньому зміщенню головки плечової кістки, що підвищує його внесок у момент до 60°.

Після 60° флексії деякі м'язи манжети "передають" основну роль іншим м'язам.

Підостьовий м'яз (*m. infraspinatus*) і малий круглий м'яз (*m. teres minor*) – м'язи, які забезпечують зовнішню ротацію, і часто включаються в роботу після кута згинання 60°.

Розглянемо функцію підостьового м'язу (*m. infraspinatus*) при флексії плеча. При пасивному згинанні сила *m. infraspinatus* майже постійна і низька, через те, що флексія не є основною його функцією. Відповідно при згинанні з вагою, сила м'яза збільшується, але переважно для стабілізації. В наслідок не профільності функції згинання, активність м'яза знижується при куті більше 40° - 50°.

Крутний момент *m. infraspinatus* в пасиві, відповідно рівню сили змінюється повільно, і значно зростає при згинанні плеча з вагою, але як протидія передньому зміщенню голівки плеча, і зменшується після кута згинання у 40°, відповідно зменшенню сили м'яза на цьому відрізку.

Розглянемо четвертий м'яз ротаторної манжети плеча - малий круглий м'яз (*m. teres minor*). Зміна сили *m. teres minor* при пасивному згинанні практично не змінюється, а при згинанні з вагою зростає

майже втричі. Виходячи, що траєкторія зміни сили *m. teres minor* не залежить від кута згинання, основна його функція направлена суто на стабілізацію голівки плеча.

Крутний момент малого крутного м'яза в пасивного русі змінюється виключно через зміну кута дії сили, і у не значних межах (0,5 Нм), хоча при згинанні з вагою спостерігаємо помітне зростання величини крутного моменту на всій траєкторії руху. Треба відмітити наявність від'ємного крутного моменту при 0 куті згинання, що свідчить про те, що вага в руці відхиляє м'яз назад.

**Обговорення.** Мета роботи полягала в тому, щоб оцінити роботу м'язів, відповідальних за стабілізацію плечового суглоба при рухах, в даному дослідженні при згинанні. Як було визначено при пасивних рухах, м'язи-ротатори манжети плеча виконують переважно пасивну роль стабілізаторів і до кута 30-40° не збільшують силу стабілізації. Але при згинанні руки з вагою (2 кг), відмічається збільшення активації м'язів, причому м'язи, розташовані зверху (*m. supraspinatus*) активується помітно менше, десь вдвічі, на відміну від бічних м'язів (*m. subscapular*, *m. infraspinatus* і *m. teres minor*), сила яких збільшується втричі. Це пов'язано з тим, що верхній м'яз (*m. supraspinatus*) при згинанні руки не змінює вектор дії сил, більш того, по мірі збільшення кута згинання зменшується його довжина, що і зменшує необхідну силу. Тобто, основна його роль залишається в підтримці стабільності суглоба – утримання голівки плеча.

М'язи, розташовані з боку лопатки, при зміні кута згинання, крім зміни векторів дії сили, збільшують свою довжину, хоча і не значно, але в силу дії гравітаційних сил, при згинанні руки з вагою, для підтримки стабільності плеча, м'язи збільшують свою силу.

Згинання руки до 40-60° відбувається переважно рухами у плечовому суглобі (гленоїді), який забезпечується передньою порцією дельтоподібного м'яза, великим грудним м'язом і безпосередньо біцепсом. Подальший рух вимагає задіяння м'язів, відповідальних за рух лопатки (*m. serratus anterior*, *m. trapezius* (*pars descendens*), *mm. rhomboidei*).

При ендопротезуванні плечового суглоба при можливості бажано зберегти м'язи ротаторної манжети плеча і дельтоподібний м'яз, або намагатися мінімального їх ушкодження. *M. teres minor* [13], як частина ротаторної манжети, разом з *m. infraspinatus* утримує суглоб, запобігаючи вивиху протеза [14]. Дельтоподібний м'яз і манжета (включно з *teres minor*) забезпечують флексію, ротацію та відведення.

Пошкодження веде до слабкості, втрати зовнішньої ротації та ускладнень (наприклад, нестабільності).

**Висновки.** Отримані результати моделювання підтверджують, що м'язи ротаторної манжети плеча в основному відіграють роль у стабілізації плечового суглоба. У пасивному режимі (без ваги) вони проявляють мінімальну активність до кута згинання 30–40°, виконуючи переважно пасивну стабілізаційну функцію. Натомість при згинанні руки з додатковою вагою спостерігається значне зростання сили м'язів-стабілізаторів, що свідчить про їх активну участь у протидії гравітаційному навантаженню та утриманні головки плечової кістки.

Отримані дані є цінними при плануванні ендопротезування плечового суглоба. Збереження м'язів ротаторної манжети, має вирішальне значення для забезпечення стабільності протеза, рухливості суглоба та запобігання післяопераційним ускладненням.

### **Література.**

1. Lugo R, Kung P, Ma CB. Shoulder biomechanics. *Eur J Radiol.* 2008 Oct;68(1):16-24. doi: 10.1016/j.ejrad.2008.02.051. Epub 2008 Jun 3. PMID: 18511227
2. Halder AM, Itoi E, An KN. Anatomy and biomechanics of the shoulder. *Orthop Clin North Am.* 2000 Apr;31(2):159-76. doi: 10.1016/s0030-5898(05)70138-3. PMID: 10736387
3. Bryant D, Litchfield R, Sandow M, Gartsman GM, Guyatt G, Kirkley A. A comparison of pain, strength, range of motion, and functional outcomes after hemiarthroplasty and total shoulder arthroplasty in patients with osteoarthritis of the shoulder. A systematic review and meta-analysis. *Journal of Bone and Joint Surgery (American Volume).* 2005; 87(9):1947–56
4. Hermena S, Rednam M. Reverse Shoulder Arthroplasty. 2024 Mar 13. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan–. PMID: 34662059.
5. Akhtar A, Richards J, Monga P. The biomechanics of the rotator cuff in health and disease - A narrative review. *J Clin Orthop Trauma.* 2021 Apr 26;18:150-156. doi: 10.1016/j.jcot.2021.04.019. PMID: 34012769; PMCID: PMC8111677.
6. Pegreff F, Pellegrini A, Paladini P, Merolla G, Belli G, Velarde PU, Porcellini G. Deltoid muscle activity in patients with reverse shoulder prosthesis at 2-year follow-up. *Musculoskelet Surg.* 2017 Dec;101(Suppl 2):129-135. doi: 10.1007/s12306-017-0516-6. Epub 2017 Oct 30. PMID: 29086336.
7. Clouthier AL, Hetzler MA, Fedorak G, Bryant JT, Deluzio KJ, Bicknell RT. Factors affecting the stability of reverse shoulder arthroplasty: a biomechanical study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013 Apr;22(4):439-44. doi: 10.1016/j.jse.2012.05.032. Epub 2012 Aug 30. PMID: 22939407.

8. Seth A, Sherman M, Reinbolt JA, Delp SL. OpenSim: a musculoskeletal modeling and simulation framework for *in silico* investigations and exchange. *Procedia IUTAM*. 2011;2:212-232. doi: 10.1016/j.piutam.2011.04.021. PMID: 25893160; PMCID: PMC4397580
9. 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
10. 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
11. Wattanaprakornkul D, Halaki M, Boettcher C, Cathers I, Ginn KA. A comprehensive analysis of muscle recruitment patterns during shoulder flexion: an electromyographic study. *Clin Anat*. 2011 Jul;24(5):619-26. doi: 10.1002/ca.21123. Epub 2011 Jan 12. PMID: 21647962.
12. Aguirre K, Mudreac A, Kiel J. Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Subscapularis Muscle. [Updated 2023 Aug 28]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513344/>
13. Franceschi F, Giovannetti de Sanctis E, Gupta A, Athwal GS, Di Giacomo G. Reverse shoulder arthroplasty: State-of-the-art. *J ISAKOS*. 2023 Oct;8(5):306-317. doi: 10.1016/j.jisako.2023.05.007. Epub 2023 Jun 8. PMID: 37301479..
14. Chawla H, Gamradt S. Reverse Total Shoulder Arthroplasty: Technique, Decision-Making and Exposure Tips. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2020 Apr;13(2):180-185. doi: 10.1007/s12178-020-09613-3. PMID: 32147779; PMCID: PMC7174471.