

Бур'янов О.А.¹, Кваша В.П.¹, Марцьоха А.В.¹, Фам Д.К.²

¹Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анатомо-біомеханічна роль зв'язкового апарату у стабілізації акроміально-ключичного суглоба

Резюме. Актуальність. Вивихи акроміального кінця ключиці є доволі поширеним травматичним пошкодженням опорно-рухового апарату. Дане пошкодження становить 3–26,1 % від загальної кількості вивихів інших локалізацій і займає третє місце після вивихів плеча та передпліччя. Зустрічається переважно у чоловіків молодого, працездатного віку. Незадовільні результати лікування пацієнтів з вивихом акроміального кінця ключиці зумовлені цілою низкою чинників, однак найбільшу увагу варто приділяти складності анатомо-біомеханічних відношень анатомічних структур плечового пояса в забезпеченні рухів, насамперед у плечовому суглобі. **Мета:** визначити анатомо-біомеханічну значущість складових зв'язкового апарату у стабілізації акроміально-ключичного суглоба шляхом комп'ютерного моделювання. **Матеріали та методи.** Для побудови імітаційної моделі використовувалася програмний пакет КОМПАС-3D, що дозволило отримати моделі ключиці та лопатки, максимально наближені до реальних, з урахуванням анатомічних особливостей. **Результати.** Шляхом комп'ютерного моделювання була визначена роль кожної зв'язки у стабілізації акроміально-ключичного суглоба. Подані розрахунки дозволяють зробити висновок, що функція *lig. trapezoideum* полягає в протидії зміщенню ключиці відносно лопатки доверху і вперед, в той час як *lig. conoideum* — доверху і назад. **Висновки.** Втрата жорсткості системою «ключиця — лопатка» при пошкодженні *lig. coracoclaviculare superior* та *inferior* (8,5 Н/мм) є значно суттєвішою за таку при пошкодженні *lig. conoideum* і *lig. trapezoideum* (11,6 Н/мм). Функція *lig. trapezoideum* і *lig. conoideum* (*lig. coracoclaviculare*) у стабілізації акроміального кінця ключиці в горизонтальній площині є різною, що потрібно враховувати при розробці способів оперативних втручань, що спрямовані на відновлення цієї ділянки стабілізуючого комплексу акроміально-ключичного суглоба.

Ключові слова: акроміально-ключичний суглоб; зв'язковий апарат; комп'ютерне моделювання

Вступ

Вивихи акроміального кінця ключиці (ВАКК) є доволі поширеним травматичним пошкодженням опорно-рухового апарату. Дане пошкодження становить 3–26,1 % від загальної кількості вивихів інших локалізацій і займає третє місце після вивихів плеча та передпліччя. Зустрічається переважно у чоловіків молодого, працездатного віку. Надані статистичні показники є незмінними протягом щонайменше останнього півстоліття [7, 11].

Незадовільні результати лікування пацієнтів з ВАКК зумовлені цілою низкою чинників, однак найбільшу увагу варто приділяти складності анатомо-біомеханічних відношень анатомічних структур

плечового пояса в забезпеченні рухів, насамперед у плечовому суглобі.

Аналіз літературних джерел свідчить про майже столітню дискусію, що є головним стабілізатором акроміально-ключичного суглоба (АКС) (в нашому розумінні — «ключем»). На сьогодні сформувались дві позиції:

- 1) головними в стабілізації АКС є ключично-акроміальні зв'язки [1–3, 14];
- 2) головною в стабілізації АКС є дзюбоподібно-ключична зв'язка [3, 5].

Наслідком вищезазначених протирічч стало формування наступних напрямків оперативних втручань, що включають відновлення зв'язкового апарату (авто- або алотрансплантатами), а саме відновлення ключично-

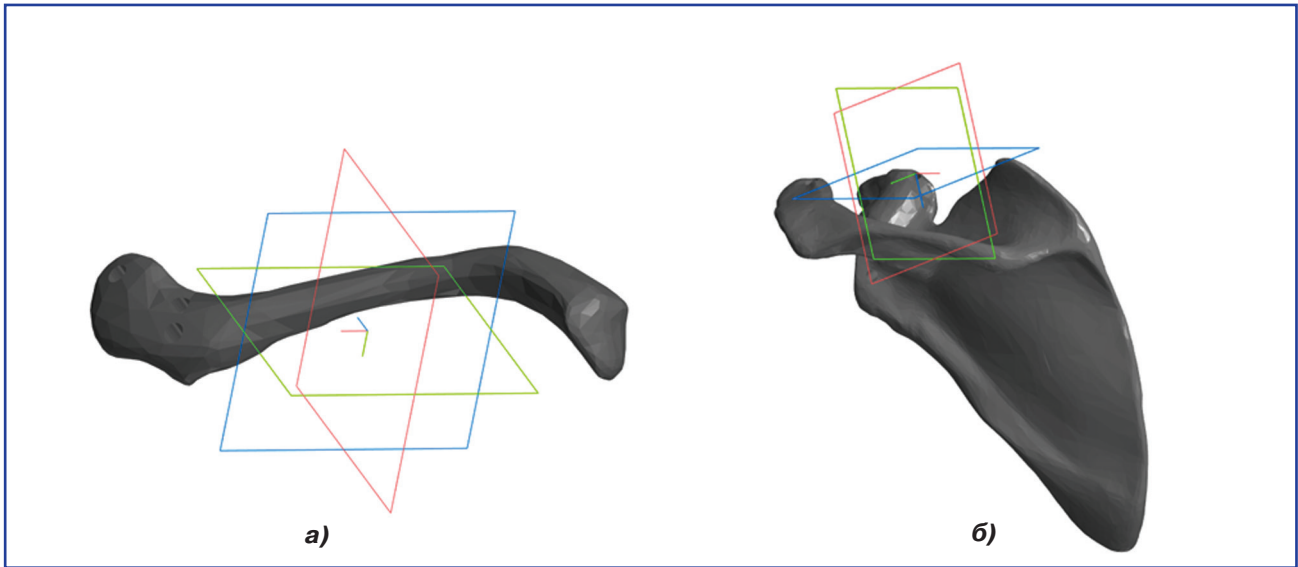


Рисунок 1. Моделі досліджуваної системи: а) ключиця; б) лопатка

акроміальної [4, 6], дзьобоподібно-ключичної зв'язки [7, 10, 11] або обох зв'язок, що започаткував Bunnel [9, 10, 12].

Таким чином, аналіз наукових літературних джерел свідчить, що ВАКК є актуальним питанням сучасної ортопедії та травматології. Однак у розумінні впливу зв'язкового апарату при варіабельності його пошкоджень на порушення конгруентності в акроміальному кінці ключиці, а відповідно — на раціональну тактику оперативного втручання існують суттєві протиріччя, що є обґрунтуванням для подальших різнопланових досліджень.

Мета: визначити анатомо-біомеханічну значущість складових зв'язкового апарату у стабілізації акроміально-ключичного суглоба шляхом комп'ютерного моделювання.

Матеріали та методи

Доцільність визначення та порівняння жорсткості систем з'єднання ключиці з лопаткою залежно від комбінації зв'язок, що досліджуються з використанням даного способу, зумовлена тим, що проведення натурних (трупний матеріал) експериментальних досліджень із визначення жорсткості систем не завжди є можливим із причин своєї складності, етичності та трудомісткості. Не заперечуючи в цілому важливість натурних досліджень, варто взяти до уваги зміну характеристик зв'язкового апарату, що пов'язана з терміном смерті, у зв'язку з чим для вирішення поставлених завдань як альтернативу експериментальним натурним дослідженням було проведено моделювання процесів деформування систем ключиці та лопатки з різними комбінаціями зв'язок з використанням сучасних комп'ютерних засобів.

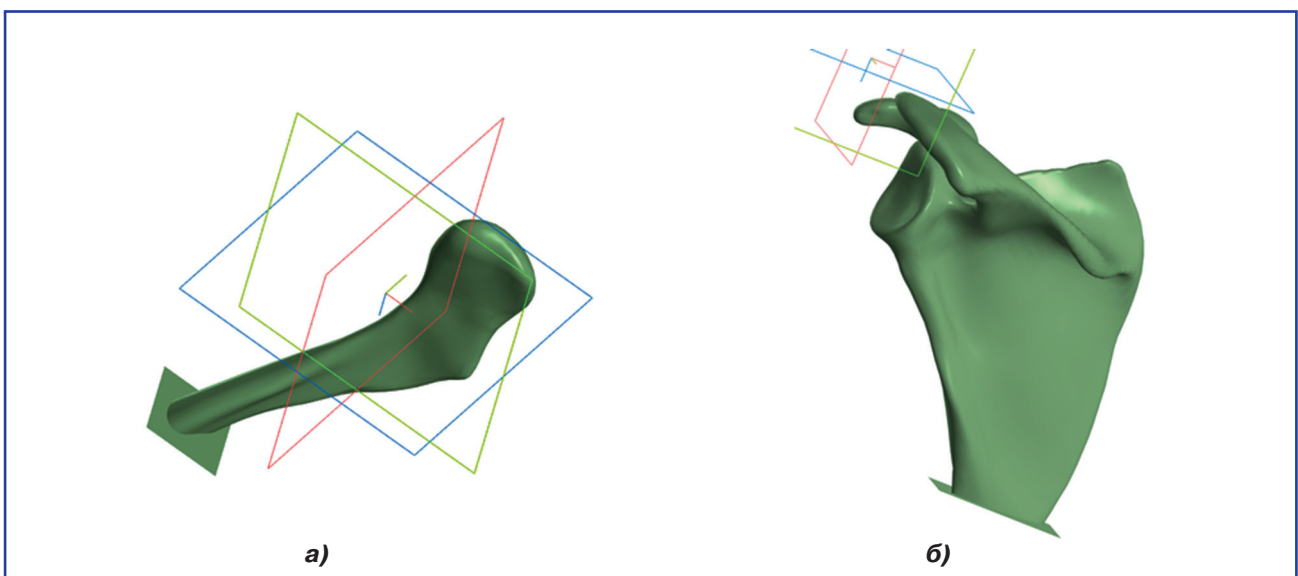


Рисунок 2. Спрощені моделі досліджуваної системи: а) ключиця; б) лопатка

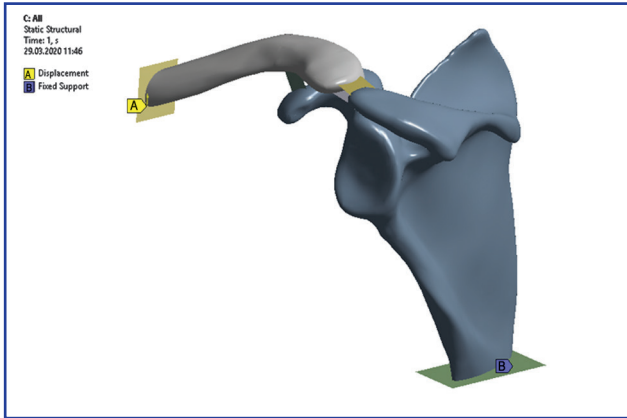


Рисунок 3. Досліджувана система з усіма цілими зв'язками

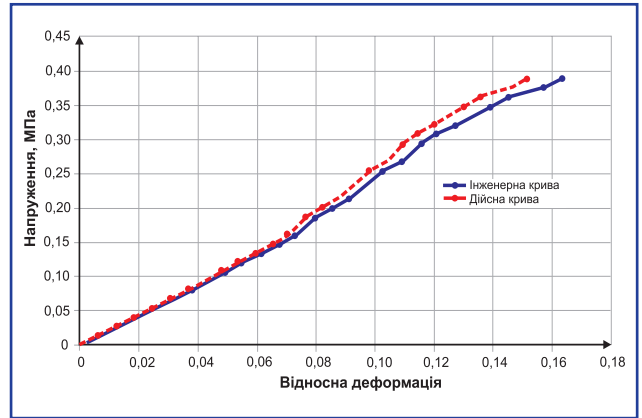


Рисунок 4. Експериментальні криві деформації джгутів

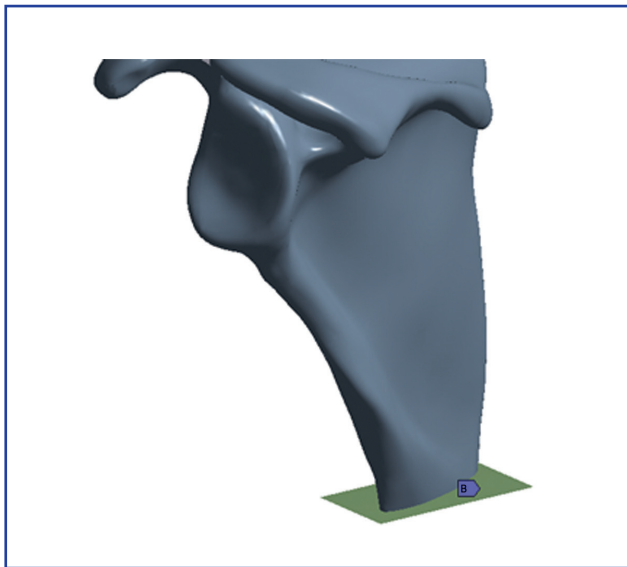


Рисунок 5. Місце (площина B) фіксації лопатки

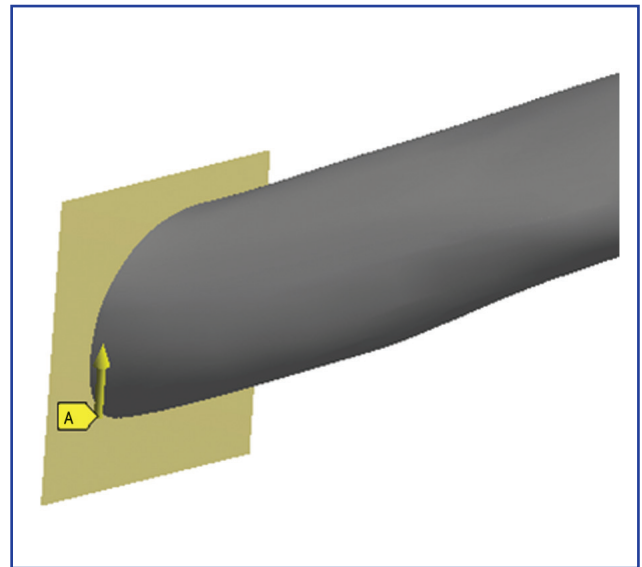


Рисунок 6. Місце (площина A) прикладання навантаження (переміщення) на ключиці

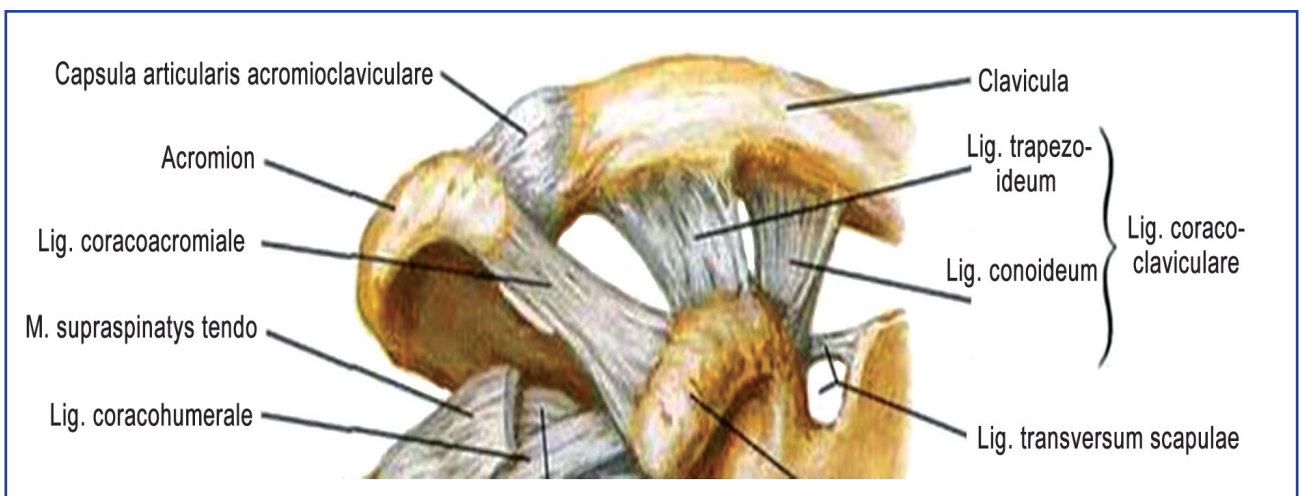


Рисунок 7. Зв'язковий апарат акроміально-ключичного суглоба

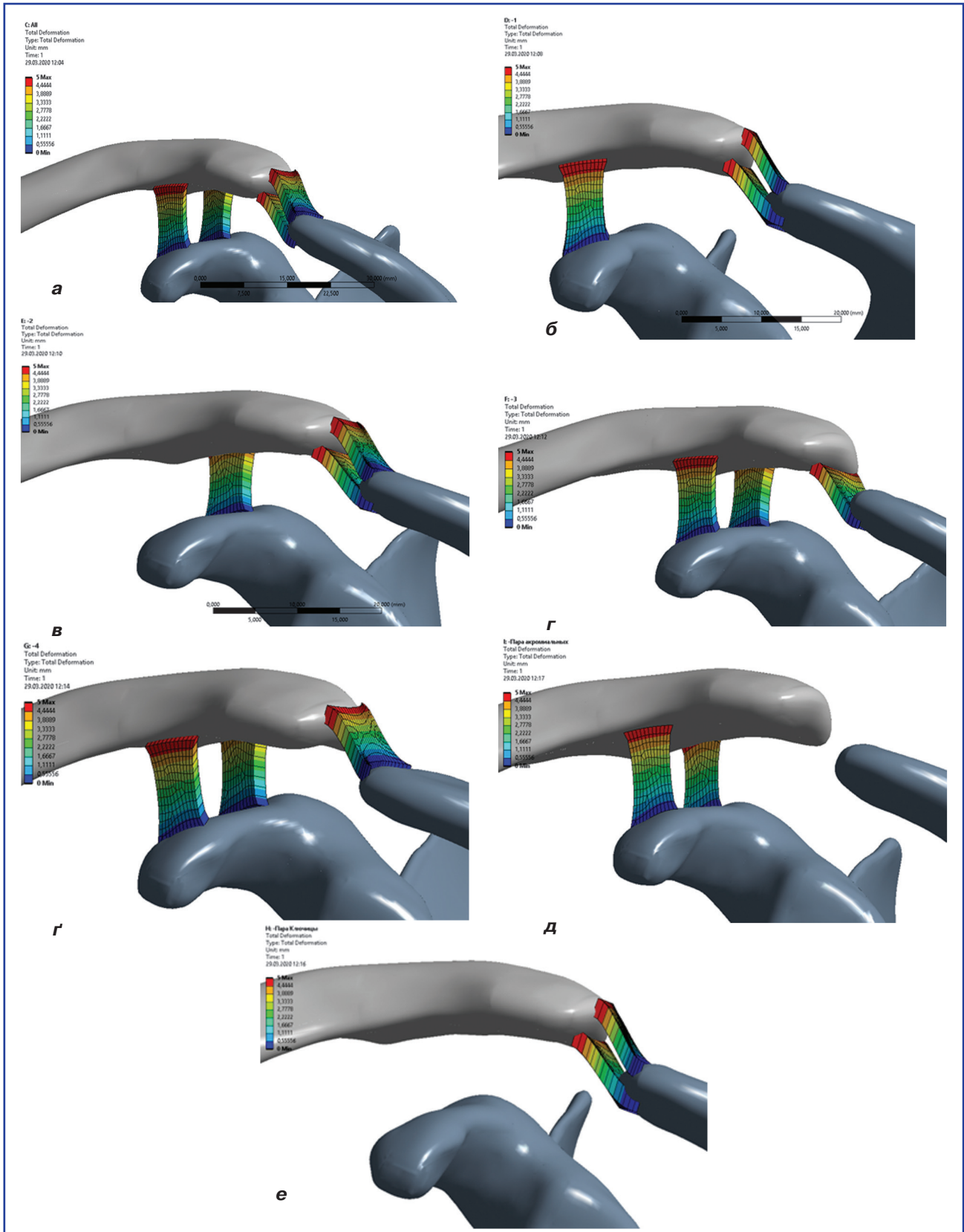


Рисунок 8. Поля розподілу переміщення при різних комбінаціях пошкоджених зв'язок: а – зв'язковий апарат акроміально-ключичного суглоба в нормі; б – пошкодження *lig. conoideum*; в – пошкодження *lig. trapezoideum*; г – пошкодження *lig. coracoacromiale superior*; г' – пошкодження *lig. coracoacromiale inferior*; д – пошкодження *lig. coracoacromiale superior, inferior*; е – пошкодження *lig. conoideum, lig. trapezoideum*

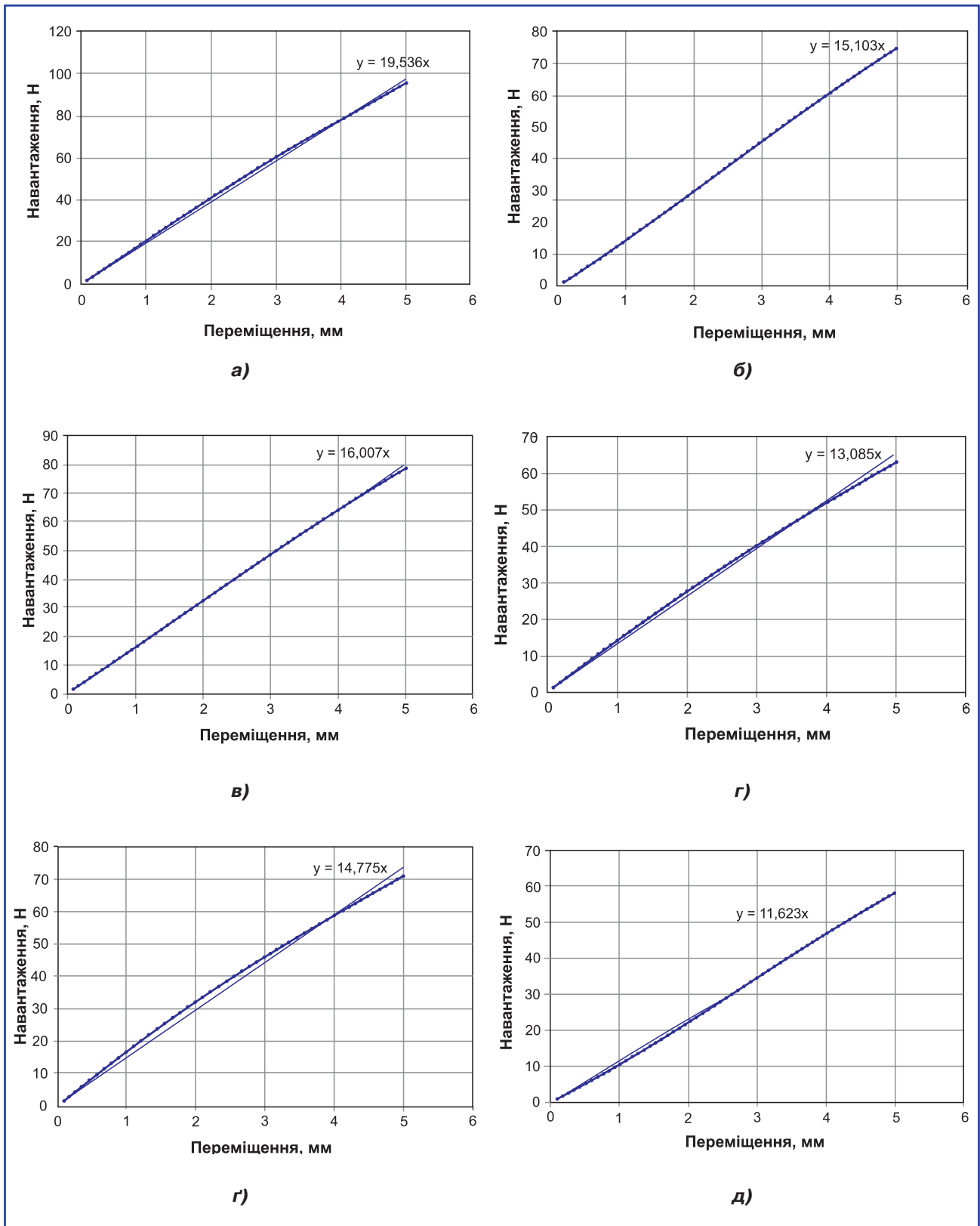


Рисунок 9. Поля розподілу переміщення при різних комбінаціях пошкоджених зв'язок: а – зв'язковий апарат акроміально-ключичного суглоба в нормі; б – пошкодження *lig. conoideum*; в – пошкодження *lig. trapezoideum*; г – пошкодження *lig. coracoacromiale superior*; г – пошкодження *lig. coracoacromiale inferior*; д – пошкодження *lig. coracoacromiale superior, inferior*; е – пошкодження *lig. conoideum, lig. trapezoideum*

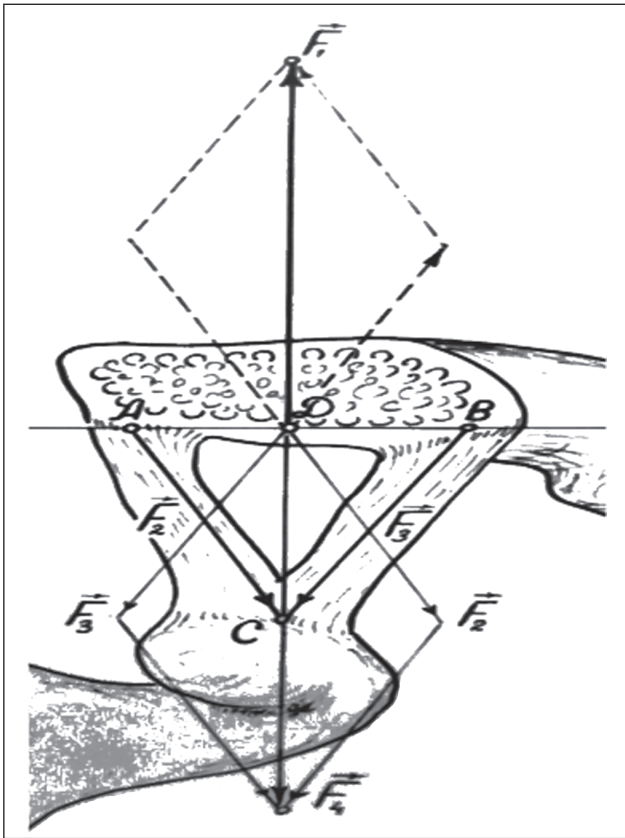


Рисунок 10. Розподіл напрямку дії стабілізуючих структур у фронтальній площині: А — місце прикріплення *lig. trapezoideum* на ключиці; В — місце прикріплення *lig. conoideum* на ключиці; С — місце прикріплення *lig. trapezoideum* та *lig. conoideum* на дзьобоподібному відростку лопатки

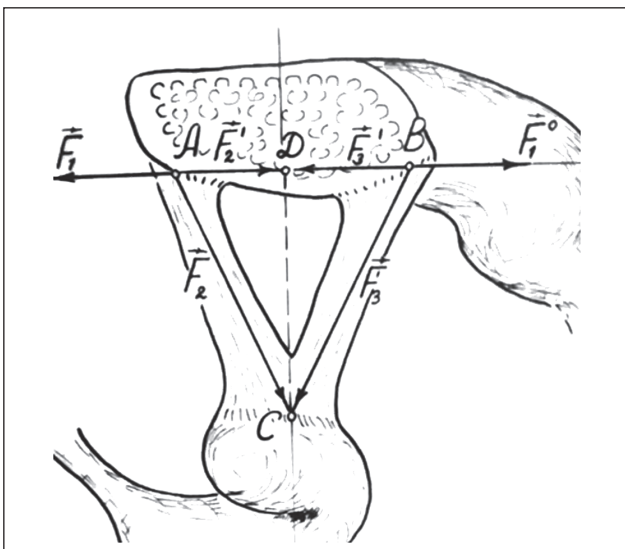


Рисунок 11. Розподіл напрямку дії стабілізуючих структур у горизонтальній площині: А — місце прикріплення *lig. trapezoideum* на ключиці; В — місце прикріплення *lig. conoideum* на ключиці; С — місце прикріплення *lig. trapezoideum* та *lig. conoideum* на дзьобоподібному відростку лопатки

Для побудови імітаційної моделі використовувалася програмний пакет КОМПАС-3D, що дозволило отримати моделі ключиці та лопатки, максимально наближені до реальних, з урахуванням анатомічних особливостей (рис. 1).

Із поданих моделей ключиці та лопатки з урахуванням методу закріплення та навантаження під час реальних експериментальних досліджень отримано нові моделі (рис. 2).

Чисельне моделювання процесу деформування систем з'єднання ключиці з лопаткою різними комбінаціями зв'язок на основі моделей, що подані на рис. 2, проводили з використанням чисельного пакета Ansys Workbench із застосуванням модуля static structural. Досліджувана система з усіма цілими зв'язками подана на рис. 3.

При моделюванні ключиця та лопатка були подані як жорсткі тіла — абсолютно тверді тіла з нескінченною жорсткістю. Таке припущення дозволило спростити розрахунки, зважаючи на те, що ключиця з лопаткою мають набагато більшу жорсткість щодо зв'язок та не будуть вносити значних змін у процесі моделювання системи при досить невеликих навантаженнях.

Як зв'язки в експериментальних дослідженнях використовувались медичні джгути. Такий матеріал є високоеластичним та обирався на основі моделі Нео-Гука, що базується на кривій деформування при розтягу отриманих в експериментальних дослідженнях (рис. 4).

Крайові умови обрані згідно з реальними експериментальними дослідженнями, таким чином, що нижня частина лопатки жорстко закріплена за аналогією з закріпленням зразка на станині випробувальної установки (рис. 5).

До частини ключиці задано переміщення 5 мм у відповідній площині, що відповідає навантаженню, прикладеному під час проведення експерименту (рис. 6).

Результати та обговорення

З метою повноцінного сприйняття подальшого матеріалу варто надати анатомію зв'язкового апарату АКС (рис. 7) [1].

Для поданої системи дослідження було проведено чисельне моделювання з отриманням полів розподілу переміщення з різними комбінаціями пошкоджених зв'язок (рис. 8).

Згідно з поданими комбінаціями пошкоджених зв'язок були отримані залежності прикладеної сили до переміщення систем (рис. 9).

Жорсткість системи «ключиця — лопатка» залежно від пошкоджених структур подана в узагальнюючій таблиці (табл. 1).

Таким чином, отримані результати комп'ютерного моделювання свідчать, що втрата жорсткості системою «ключиця — лопатка» при пошкодженні *lig. acromioclaviculare superior* та *inferior*

(8,5 Н/мм) значно суттєвіша за таку при пошкодженні lig. conoideum та lig. trapezoideum (11,6 Н/мм).

Схематичне зображення сагітального розпилю ключиці на рівні прикріплення lig. trapezoideum з урахуванням точок фіксації lig. trapezoideum та lig. conoideum на ключиці та дзьобоподібному відростку можна представити трикутником, повернутим верхівкою донизу, сторони якого відображають напрямки сил у фронтальній площині (рис. 10).

Таблиця 1. Жорсткість системи «ключиця — лопатка» залежно від пошкоджених структур

Структура	Жорсткість, Н/мм
Зв'язки АКС у нормі	19,5
Пошкодження lig. conoideum	15,1
Пошкодження lig. trapezoideum	16
Пошкодження lig. acromioclaviculare superior	13
Пошкодження lig. acromioclaviculare inferior	14,8
Пошкодження lig. acromioclaviculare superior, inferior	8,5
Пошкодження lig. conoideum, lig. trapezoideum	11,6

З наведеного зображення видно, що сила \vec{F}_4 протидіє напрямку силі \vec{F}_1 і є сумою сил \vec{F}_2 (сила протидії lig. trapezoideum) та \vec{F}_3 (сила протидії lig. conoideum): $\vec{F}_4 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$.

Розподіл напрямку дії стабілізуючих структур в горизонтальній площині подано на рис. 11.

Як показано на рис. 11, протидією силі \vec{F}_{10} , що зміщує ключицю дотрону, є сила \vec{F}_3 , зумовлена дією lig. trapezoideum, тоді як протидією силі \vec{F}_1 , що зміщує ключицю дозад, є сила \vec{F}_2 , зумовлена дією lig. conoideum.

Подані розрахунки дозволяють зробити висновок, що функція lig. trapezoideum полягає у протидії зміщенню ключиці відносно лопатки доверху і вперед, тоді як lig. conoideum — доверху і назад.

Висновки

1. Втрата жорсткості системою «ключиця — лопатка» при пошкодженні lig. coracoacromiale superior та inferior (8,5 Н/мм) значно суттєвіша за таку при пошкодженні lig. conoideum та lig. trapezoideum (11,6 Н/мм).

2. Функція lig. trapezoideum та lig. conoideum (lig. coracoacromiale) у стабілізації акроміального кінця ключиці в горизонтальній площині є різною, що потрібно враховувати при розробці способів оперативних втручань, спрямованих на відновлення цієї ділянки стабілізуючого комплексу акроміально-ключичного суглоба.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека. М.: Медицина, 1967. Т. 1. 460 с.
2. Двойников С.И. Клинико-функциональные аспекты диагностики и лечения поврежденной сухожильно-мышечного аппарата: автореф. дис... д-ра мед. наук. Самара, 1992. 23 с.
3. Забелин И.Н. Клинико-экспериментальное обоснование восстановления ключовидно-ключичной связки при повреждении акроміально-ключичного сустава: автореф. дис... канд. мед. наук. Запорожье, 2015. 168 с.
4. Кваша В.П. Хирургическое лечение вывихов акроміального конца ключицы: автореф. дис... канд. мед. наук. Киев, 1990. 144 с.
5. Обросов П.Н. Хирургия плечевого пояса. М.: Главнаука, 1930. 112 с.
6. Сорокин А.А. Тактика хирургического лечения вывихов акроміального конца ключицы.: дис... канд. мед. наук. М., 2008. 154 с.
7. Braun S., Martetcschlager F., Imhoff A.B. Acromioclavicular joint injuries and Reconstruction. Sports injuries: Prevention, diagnosis, treatment and rehabilitation. Berlin: Springer, 2015. P. 1-12.
8. Breslow M.J., Jazrawi L.M., Berhstein A.D. et al. Treatment of acromio-clavicular joint separation: Suture or suture anchors? J. Shoulder Elbow Surg. 2002. Vol. 11. P. 225-229.
9. Hesseman M., Golzen L., Gehling H. et al. Reconstruction of complete acromioclavicular separations (Tossy III) using PDS-banding as augmentation: experience in 64 cases. Acta Chir. Belg. 1995. Vol. 95. P. 147-151.
10. Lädermann A., Gueorguiev B., Stimec B. et al. Acromioclavicular joint reconstruction: a comparative biomechanical study of three techniques. J. of Shoulder and Elbow Surgery. 2013. Vol. 22, issue 2. P. 171-178.
11. Lom P. Akromioklavikularni disjunkce. Cast 1: Diagnostika a klasifikace. Rozh. Chir. 1988. Vol. 67. № 4. P. 253-262.
12. Mohamed H.S. Midterm results on acromioclavicular and Coracoclavicular reconstruction using nylon tape. Arthroscopy. 2012. Vol. 28. № 8. P. 1050-1057.
13. Rosenorn M., Pedersen E.B. A comparison between conservative and operative Treatment of Acute Acromioclavicular dislocation. Acta Orthop. Scand. 1974. № 45. P. 50-59.
14. Salter E.G. Jr., Nasca R.J., Shelley B.C. Anatomical observation on the acromioclavicular joint and supporting ligamentis. Amer. J. Sport. Med. 1987. № 15. P. 199-206.
15. Walz L., Salzman G.M., Fabbro T. et al. The Anatomy Reconstruction of Acromioclavicular joint Dislocations Using 2 Tight — Rope Devices. A Biomechanical Study. An. J. Sports Med. 2008. Vol. 36. № 12. P. 2398-2406.

Отримано/Received 11.02.2020

Рецензовано/Revised 20.02.2020

Прийнято до друку/Accepted 24.02.2020 ■

Бурьянов А.А.¹, Кваша В.П.¹, Марцьоха А.В.¹, Фам Д.К.²

¹Национальный медицинский университет имени А.А. Богомольца, г. Киев, Украина

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Анатомо-биомеханическая роль связочного аппарата в стабилизации акромиально-ключичного сустава

Резюме. Актуальность. Вывихи акромиального конца ключицы являются довольно распространенным травматическим повреждением опорно-двигательного аппарата. Данное повреждение составляет 3–26,1 % от общего количества вывихов других локализаций и занимает третье место после вывихов плеча и предплечья. Встречается преимущественно у мужчин молодого, трудоспособного возраста. Неудовлетворительные результаты лечения пациентов с вывихом акромиального конца ключицы обусловлены рядом факторов, однако наибольшее внимание следует уделять сложности анатомо-биомеханических взаимоотношений анатомических структур плечевого пояса в обеспечении движений, прежде всего в плечевом суставе. **Цель:** определить анатомо-биомеханическую значимость составляющих связочного аппарата в стабилизации акромиально-ключичного сустава путем компьютерного моделирования. **Материалы и методы.** Для построения имитационной модели использовался программный пакет КОМПАС-3D, что позволило получить модели ключицы и лопатки, максимально приближенные к реальным, с учетом

анатомических особенностей. **Результаты.** Путем компьютерного моделирования была определена роль каждой связки в стабилизации акромиально-ключичного сустава. Представленные расчеты позволяют сделать вывод, что функция lig. trapezoideum заключается в противодействии смещению ключицы относительно лопатки вверх и вперед, в то время как lig. conoideum — вверх и назад. **Выводы.** Потеря жесткости системой «ключица — лопатка» является значительно более существенной при повреждении lig. coracoacromiale superior и inferior (8,5 Н/мм), чем при повреждении lig. conoideum и lig. trapezoideum (11,6 Н/мм). Функция lig. trapezoideum и lig. conoideum (lig. coracoclaviculare) в стабилизации акромиального конца ключицы в горизонтальной плоскости является разной, что нужно учитывать при разработке способов оперативных вмешательств, направленных на восстановление данного участка стабилизирующего комплекса акромиально-ключичного сустава.

Ключевые слова: акромиально-ключичный сустав; связочный аппарат; компьютерное моделирование

O.A. Burianov¹, V.P. Kvasha¹, A.V. Martsocha¹, D.K. Fam²

¹Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Anatomical and biomechanical role of ligamentous apparatus in stabilization of the acromioclavicular joint

Abstract. Background. Dislocations of the acromial end of the clavicle are quite common traumatic injuries of the locomotor apparatus. These injuries account for 3–26.1 % of total number of dislocations in other localizations and takes third place after shoulder and forearm dislocations. They occur predominantly among young men of working age. Unsatisfactory results in the treatment of patients with dislocation of the acromial end of the clavicle are driven by a range of factors; however, the greatest attention should be paid to the complexity of anatomical and biomechanical relationships of anatomical structures of shoulder girdle in providing movements, especially in the shoulder joint. The purpose: to determine anatomical and biomechanical importance of ligamentous apparatus components in stabilization of the acromioclavicular joint through computer simulation. **Materials and methods.** To build a simulation model, the KOMPAS-3D software package was used, which made it possible to obtain models of clavicle and scapula close to real ones, taking into account anatomical features.

Results. Through computer simulation, the role of each ligament in stabilization of the acromioclavicular joint was determined. Presented calculations allow us to conclude that lig. trapezoideum function is counteract the displacement of the clavicle relatively to scapula up and forward, while lig. conoideum — up and back. **Conclusions.** Losing stiffness by the clavicle — scapula system is significantly more important with injury to lig. coracoacromiale superior and inferior (8.5 N/mm) than with injury to lig. conoideum and lig. trapezoideum (11.6 N/mm). The function of lig. trapezoideum and lig. conoideum (lig. coracoclaviculare) in the stabilization of the acromial end of the clavicle in horizontal plane is different, which should be taken into account when developing ways of operative interventions that are aimed at restoring this section of stabilizing complex of acromioclavicular joint.

Keywords: acromioclavicular joint; ligamentous apparatus; computer simulation