

УДК 616.727.1:616.755]-089.22-047.58(045)

## Моделирование восстановления клювовидно-ключичной связки при повреждениях акромиально-ключичного сустава

И. Н. Забелин<sup>2</sup>, М. Л. Головаха<sup>1</sup>, И. В. Шишка<sup>2</sup>, С. В. Чопоров<sup>3</sup>, С. И. Гоменюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Запорожский государственный медицинский университет. Украина

<sup>2</sup> Запорожская областная клиническая больница. Украина

<sup>3</sup> Запорожский национальный университет. Украина

*Objective: to build a model of reconstruction of the coracoclavicular ligament in cases of the acromioclavicular joint injuries and to determine the position of point for the fixateur on the clavicle ensuring minimal forces in the artificial ligament. Model of the acromioclavicular joint represented as a system of interacting rigid rods was taken as a basis. As a result of this study of equilibrium of the system there was obtained a formula allowing to determine the position of point for the fixateur on the clavicle which corresponds to minimal reaction of footing (tensile force) in the fixateur. Channel position in the clavicle for mounting of the fixateur depends on its length. Therefore the most favorable point for the channel in the acromial end of the clavicle has to be located at a distance from 12.9 up to 15.5 % of its total length. Key words: acromioclavicular joint, clavicle, method of fixation, point of fixation, injury and reconstruction of ligaments.*

*Мета роботи: побудувати розрахункову модель відновлення дзьобоподібно-ключичної зв'язки в разі ушкоджень надплечево-ключичного суглоба та визначити положення точки кріплення фіксатора на ключиці, що забезпечує мінімальне зусилля у штучній зв'язці. За основу взято модель надплечево-ключичного суглоба, в якій він представлений у вигляді системи взаємодіючих жорстких стрижнів. У результаті дослідження рівноваги системи отримано вираз, за допомогою якого можна визначити положення точки кріплення фіксатора на ключиці, яка відповідає мінімальній реакції опори (сили, що розтягує) у фіксаторі. Положення каналу в ключиці для проведення фіксатора залежить від її довжини. Тому найсприятливіша точка для проведення каналу в надплечевому кінці ключиці має розташовуватися на відстані від 12,9 до 15,5 % від її загальної довжини. Ключові слова: надплечево-ключичний суглоб, ключиця, метод фіксації, точка фіксації, ушкодження та відновлення зв'язок.*

**Ключевые слова:** акромиально-ключичный сустав, ключица, метод фиксации, точка фиксации, повреждение и восстановление связок

### Введение

Существует более ста видов хирургического лечения вывиха акромиального конца ключицы [4, 9]. Последнее 10 лет широко используют фиксацию акромиального конца ключицы по методике Endobutton, или внутренней «пуговицы». Из результатов исследований механических свойств отдельных структур связочного аппарата акромиально-ключичного сустава следует, что прочность клювовидно-ключичной связки превышает прочность акромиально-ключичной. Эта связка является более значимой в кинематике акромиально-ключичного сустава [8, 9]. Необходимо подчеркнуть, что

после проведения ряда экспериментальных исследований на трупном материале многие авторы доказали, что при использовании системы Endobutton в различных ее модификациях достигается наиболее надежная фиксация ключицы по сравнению с другими методами фиксации [6–8].

Согласно методике один элемент системы при фиксации должен находиться под клювовидным отростком, другой — над ключицей, а между ними — синтетический материал (нить, лента). Канал в клювовидном отростке формируют перпендикулярно поверхности у места перехода его тела в основание, а в ключице напротив клювовидного

отростка лопатки по ходу поврежденной клювовидно-ключичной связки [7, 8].

Анализ научной литературы показывает, что методика фиксации описана не в полном объеме, в частности вопросу выбора места расположения канала на ключице уделено недостаточно внимания. Неправильный выбор положения точки крепления фиксатора на ключице может привести к повреждению синтетического материала (нити) между ключицей и клювовидным отростком и, как следствие, к рецидиву вывиха [7–9].

*Цель работы:* определить положение точки крепления фиксатора Endobutton на ключице путем разработки и анализа модели восстановления клювовидно-ключичной связки при повреждениях акромиально-ключичного сустава.

## Материал и методы

Нами предложен метод хирургического лечения при помощи системы «АКК-Такелаж», направленный на восстановление ключично-клювовидной связки, основным принципом которого является совпадением ориентации фиксирующего элемента с вектором силы поврежденных клювовидно-ключичных связок [4, 5]. Метод позволяет добиться достаточной стабильности акромиального конца ключицы с сохранением микроподвижности в суставе, что создает благоприятные условия для сращения связок. Для определения положения точки крепления фиксатора за основу взята модель акромиально-ключичного сустава, в которой последний представлен в виде системы взаимодействующих жестких стержней (рис. 1) [3].

Стержень  $AC$  представляет собой ключицу, длина которой  $l$ ,  $BD$  — модель связки (или фиксатора «АКК-Такелаж») длиной  $l_f$ . Предположительно, стержни в точке контакта (точке  $B$ ) ортогональны и при этом сосредоточенная нагрузка величины  $F$  приложена в точке контакта и действует вдоль стержня  $BD$ . Стержень  $AC$  считаем шарнирно закрепленным в точках  $A$  и  $C$ , т. е. прогиб стержня в этих точках принимаем равным нулю. Такая расчетная схема позволяет при заданных геометрических и механических характеристиках элементов системы определить ее напряженно-деформированное состояние, однако при этом весьма затруднительно производить оценку положения точки  $B$  с точки зрения рационального распределения сил между ключицей и фиксатором.

## Результаты и их обсуждение

Рассмотрим расчетную модель акромиально-ключичного сустава с искусственным фиксатором.

Пусть стержень  $AC$ , длина которого  $l$ , представляет собой модель ключицы (рис. 2).

Наиболее дистальной точкой акромиального конца ключицы является точка  $A$ . Точка  $C$  — самая проксимальная точка стернового конца ключицы. На расстоянии  $x$  от точки  $A$  на ключице располагается фиксатор (точка  $B$ ), второй конец которого в точке  $D$  закреплен на клювовидном отростке, при этом величина  $a$  — расстояние от акромиального конца ключицы (точка  $A$ ) до проекции на ключицу точки крепления фиксатора на клювовидном отростке (точка  $D$ ), а величина  $b$  — расстояние от верхнего края ключицы до верхнего края клювовидного отростка.

При повреждениях нативных связок акромиально-ключичного сустава происходит вывих акромиального конца ключицы. Следовательно, можно предположить, что в точке  $A$  ключица станет свободной, а точку  $C$  принять шарнирно закрепленной. Поскольку фиксация выполнена гибким элементом (лента, нить), точки ее крепления  $B$  и  $D$  можно также рассматривать как шарниры.

Из всего разнообразия сил, действующих на акромиально-ключичный сустав в процессе движения тела человека, рассмотрим случай силы  $F$ , сосредоточенной на акромиальном конце ключицы и перпендикулярной к ее оси. Пусть предложенная биомеханическая система находится в равновесии

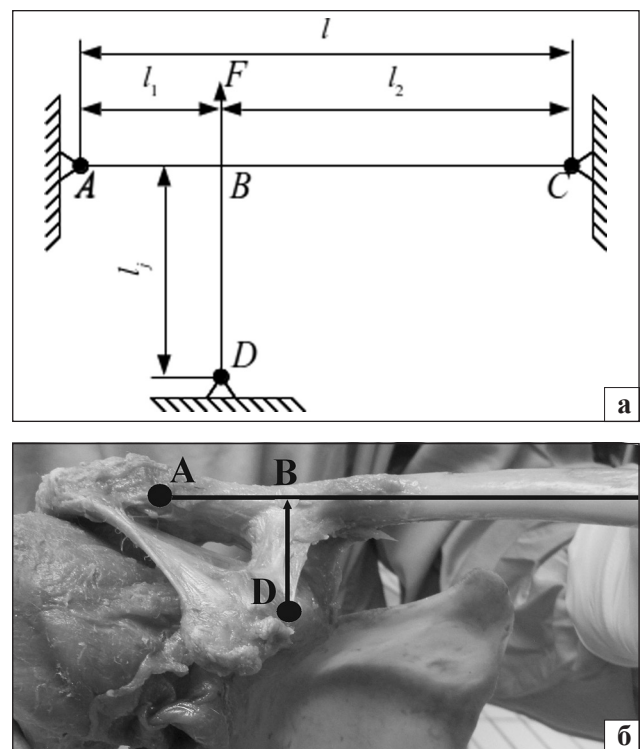


Рис. 1. Модель акромиально-ключичного сустава: а) стержневая; б) реальный объект и схема

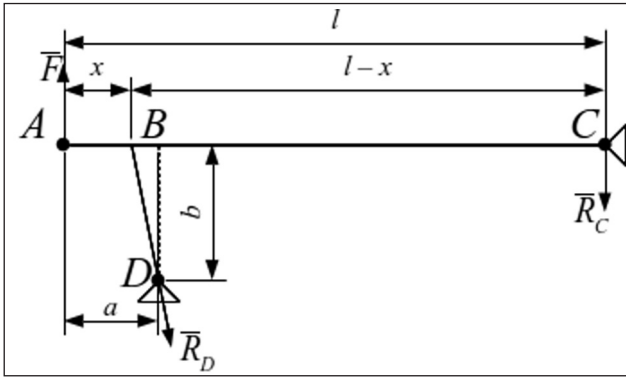


Рис. 2. Биомеханическая модель ключицы с фиксатором

под действием силы  $F$ . В точках  $C$  и  $D$  будут действовать реактивные силы  $R_C$  и  $R_D$  соответственно. Сила  $R_D$  будет соответствовать реакции на растяжение стержня  $BD$  и, следовательно, будет направлена вдоль данного стержня (фиксатора). Исходя из условия равновесия, можно записать сумму моментов относительно точки  $C$ :

$$\bar{R}_D l_R - \bar{F} l = 0, \tag{1}$$

где  $l_R$  — плечо силы  $R_D$  относительно точки  $C$  (рис. 3).

Как в случае  $x \leq a$  (рис. 3, а), так и при  $x > a$  (рис. 3, б) длина плеча  $l_R$  может быть представлена соотношением:

$$l_R = (l - x) \sin \alpha = (l - x) \frac{b}{BD} = (l - x) \frac{b}{\sqrt{(a - x)^2 + b^2}}. \tag{2}$$

Тогда в результате подстановки (2) в (1) получим выражение для  $R_D$ :

$$\bar{R}_D = \frac{Fl \sqrt{(a - x)^2 + b^2}}{(l - x)b} = \frac{Fl}{b} \sqrt{\frac{(a - x)^2 + b^2}{(l - x)^2}}. \tag{3}$$

Чтобы найти значение  $x$ , соответствующее минимальному значению силы  $R_D$  согласно исследованию функции на экстремум, необходимо найти корни производной подкоренного выражения в формуле (3). Можно проверить, что у производной подкоренного выражения есть только один корень, при котором будет реализовываться минимум искомой

реакции  $R_D$ . Значение этого корня определяется выражением:

$$x_{min} = \frac{al - a^2 - b^2}{l - a}. \tag{4}$$

**Численный анализ.** Учитывая демографические колебания размеров ключицы, представленные в литературе, за среднестатистическую модель этого сегмента скелета можно взять следующую [1, 2, 10]. Рассмотрим ключицу со средними значениями параметров модели:  $l = 155$  мм,  $a = 25$  мм и  $b = 21$  мм. Таким параметрам при значении силы  $F = 300$  Н будет соответствовать значение  $x_{min} \approx 22,3$  мм, а значение реактивной (растягивающей) силы в этой точке будет минимальным, и равным 355 Н. Зависимость реактивной силы от положения точки крепления фиксатора (расстояние от дистального края ключицы) приведена на рис. 4.

Таким образом, на основе предложенной биомеханической модели акромиально-ключичного сустава с фиксатором было установлено место его расположения. В частности для среднестатистической ключицы с  $l = 155$  мм расстояние от ее акромиального края до канала фиксатора составило 22,3 мм, что соответствует расстоянию 14,4 % от длины ключицы  $l$ . Исходя из пропорциональных изменений всех размеров конкретной ключицы, отличной от среднестатистической, точка проведения канала для ее фиксатора должна располагаться на расстоянии 14,4 % от общей длины этой ключицы. Такое расположение канала фиксатора на ключице в совокупности с расположением канала на клювовидном отростке в месте перехода его тела в основание (максимально кзади) будет означать, что фиксация осуществлена в направлении максимально приближенном к направлению поврежденной трапециевидной связки. При этом для предотвращения смещения ключицы кпереди, входное отверстие на ней необходимо формировать на границе передней и средней трети по ее ширине (рис. 5).

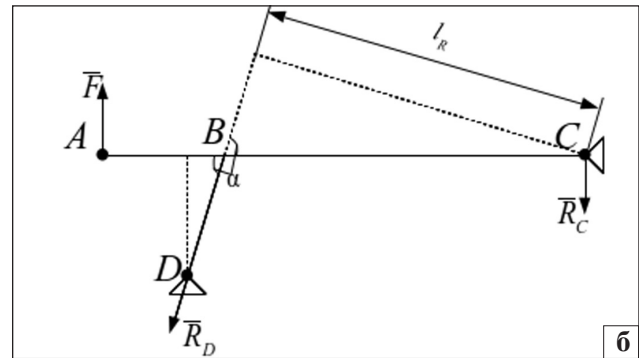
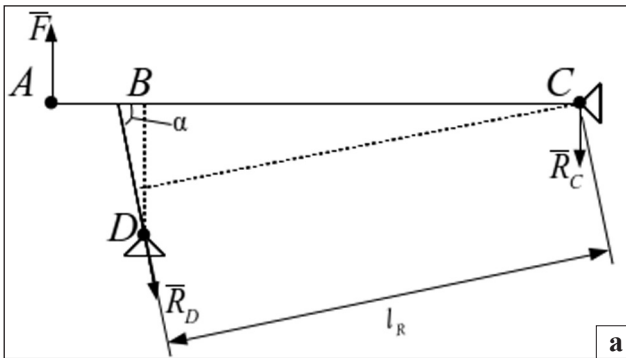


Рис. 3. Моменты сил относительно точки  $C$ : а)  $x \leq a$ ; б)  $x > a$

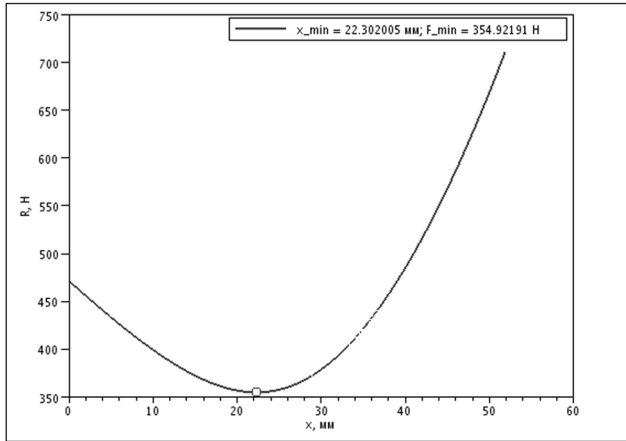


Рис. 4. Зависимость реактивной силы от расстояния точки фиксации до дистального края ключицы

Расположение фиксатора в указанном месте дало возможность снизить воздействие растягивающей силы (реакции опоры) на фиксатор до минимально возможного значения, которое составило 354,9 Н.

Следует отметить, что прочность на разрыв у нативной клювовидно-ключичной связки составляет  $(552,4 \pm 2)$  Н [7, 8], тогда как у фиксатора Endobutton в различных модификациях с высокопрочным нерассасывающимся материалом —  $(768,5 \pm 5)$  Н [7, 8]. Из этого следует, что расположение фиксатора в указанной точке позволяет создать стабильную фиксацию акромиального конца ключицы и снизить возможность «разрыва» синтетического материала (нити) и, как следствие, уменьшить риск релюксации акромиального конца ключицы.

Если проанализировать представленный график зависимости реактивной силы от расстояния точки фиксации до дистального края ключицы (рис. 4), то можно определить диапазон, при котором изменение расстояния точки фиксации от дистального конца ключицы не будет приводить к заметному изменению реактивной силы (рис. 6). Как видно на рис. 6, этот диапазон равен от 20 до 24 мм. Таким образом, наиболее благоприятное месторасположе-

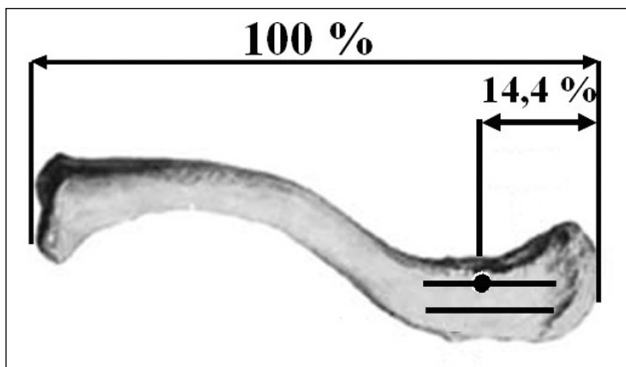


Рис. 5. Входное отверстие в правой ключице (вид сверху)

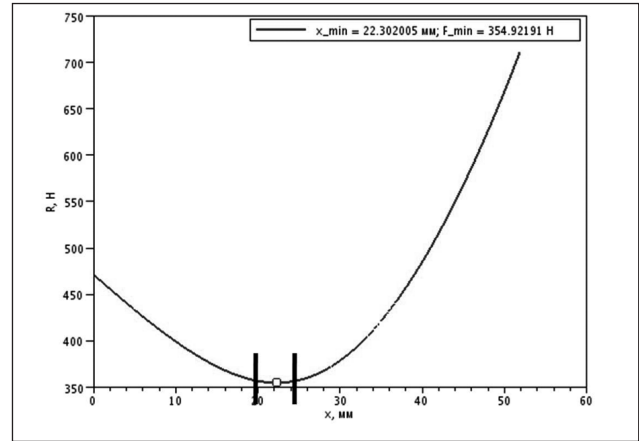


Рис. 6. Диапазон расположения фиксатора на ключице

ние точки для проведения канала в акромиальном конце ключицы должно находиться на расстоянии от 12,9 до 15,5 % от общей длины ключицы.

## Выводы

Разработана расчетная модель восстановления клювовидно-ключичной связки при повреждениях акромиально-ключичного сустава, которая позволяет определить благоприятное положение точки крепления фиксатора на ключице.

В рамках модели получено аналитическое выражение, позволяющее определить положение точки крепления фиксатора на ключице, соответствующее минимальной реакции опоры (растягивающей силы в фиксаторе).

Наиболее благоприятное место расположения точки для проведения канала в акромиальном конце ключицы должно располагаться на расстоянии от 12,9 до 15,5 % от общей длины ключицы.

## Список литературы

1. Воронцова Е. Л. К методике измерения костей плечевого пояса / Е. Л. Воронцова // Вестник антропологии. — 2004. — № 10. — С. 33–40.
2. Джигора С. Т. О половом диморфизме ключиц / С. Т. Джигора // Судебная экспертиза. — 1962. — Т. 5, № 1. — С. 16–19.
3. Малахов С. А. Оперативное лечение повреждений акромиально-ключичного сочленения с использованием лавсановых нитей: дис. ... канд. мед. наук / С. А. Малахов. — Ставрополь, 2005. — 151 с.
4. Метод малоинвазивного оперативного лечения вывихов акромиального конца ключицы / М. Л. Головаха, И. В. Шишка, И. Н. Забелин [и др.] // Літопис травматології. — 2012. — № 1. — С. 90–93.
5. Пат. 82256 UA Украина, МПК (2006.01) А61В 17/56. Способ лечения свежих вывихов акромиального конца ключицы / Головаха М. Л., Банит О. В., Красноперов С. Н. [и др.]; заявитель и патентообладатель Запорожский государственный медицинский университет, Головаха М. Л., Банит О. В., Красноперов С. Н. — № u201301908; заявл. 18.02.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
6. Acromioclavicular joint dislocation: a comparative biomechanical study of the palmaris-longus tendon graft reconstruction

- with other augmentative methods in cadaveric models / Guntur E. Luis, Chee-Khuen Yong, Deepak A. Singh, S. Sengupta David S. K. Choon // *J. Orthopaedic Surgery and Research*. — 2007. — Vol. 2. — P. 2–22.
7. Acromioclavicular joint reconstruction: a comparative biomechanical study of three techniques // A. Lädermann, B. Gueorguiev, B. Stimec [et al.] // *J. Shoulder and Elbow Surgery*. — 2013. — Vol. 22, Issue 2. — P. 171–178.
  8. The anatomic reconstruction of acromioclavicular joint dislocations using 2 TightRope devices / L. Walz, G. M. Salzman, T. Fabbro [et al.] // *Am. J. Sports Med.* — 2008. — Vol. 36. — P. 2397–2406.
  9. Traumatic acromioclavicular joint separation — Current concepts / C. Fialka, P. Stampfl, G. Oberleitner, V. Vecsei // *Eur. Surg.* — 2004. — № 36/1. — P. 20–24.
  10. Vaatainen U. Radiological evaluation of the acromioclavicular joint / U. Vaatainen, A. Pirinen, A. Makela // *Skeletal Radiol.* — 1991. — № 20. — P. 115–116.

Статья поступила в редакцию 27.11.2013

---

## MODELING OF RECONSTRUCTION OF THE CORACOCLAVICULAR LIGAMENT IN CASES OF INJURIES OF THE ACROMIOCLAVICULAR JOINT

I. N. Zabelin<sup>2</sup>, M. L. Golovakha<sup>1</sup>, I. V. Shishka<sup>2</sup>, S. V. Choporov<sup>3</sup>, S. I. Gomenuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Zaporozhzhie State Medical University. Ukraine

<sup>2</sup> Zaporozhzhie Regional Hospital. Ukraine

<sup>3</sup> Zaporozhzhie National University. Ukraine