

УДК 616.757:617.577]-089(045)

## Біомеханічне обґрунтування тактики хірургічного лікування в разі ушкодження сухожилків згиначів пальців кисті в «критичній» зоні

І. М. Курінний, І. А. Лазарев, М. Л. Ярова, М. В. Скибан

ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ

*While in reconstructive surgeries after flexor tendons of the hand fingers damage a question on appropriateness of maintaining of the superficial flexor tendon (subject to its integrity). Purpose: based on biomechanical studies and mathematical analysis of the stress-strain state (SSS) of the fingers' flexor apparatus and to substantiate tactics of treatment for patients with isolated flexor tendons of the hand fingers injuries. Methods: Calculations on tension changes in anatomic areas annular ligaments and tendon insertions of superficial and deep flexor tendons depending on the bending angles in the interphalangeal joints were done. Using finite element analysis we built three models: 1 — with intact tendons of superficial and deep flexor tendons, 2 — with damaged superficial flexor tendon, 3 — with damaged deep flexor tendon. Calculations of SSS for structures of flexor fingers apparatus were performed. Results: it was proved that in the absence of superficial flexor tendon at intersegmental flexion angles from 0° to 70° tension in the distal tendon attachment points of the deep flexor and in annular ligaments  $A_3$  and  $A_2$  increases with the maximum values when bent 70°. We propose a two-stage method of the deep flexor tendon plastic with maintenance of superficial flexor tendon (patent of Ukraine № 85349). Conclusions: in the standard load on the flexion apparatus of the fingers in cases of isolated deep flexor tendon injuries it is advisable to maintain the superficial flexor for prevention of overstrain in the distal point of the deep flexor tendon insertion as well as ligamentous apparatus of the finger (annular ligaments  $A_1$ – $A_2$ ). Key words: tendon, superficial and deep flexors, critical zone, annular ligaments, isolated damage, strain.*

*При проведенні реконструктивних втручань по поводу поврежденной сухожильной сгибателей пальцев кисти часто возникает вопрос о целесообразности сохранения сухожилия поверхностного сгибателя (при условии его целостности). Цель: на основе биомеханических и математических исследований проанализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) сгибательного аппарата пальцев кисти и обосновать тактику лечения больных с изолированными повреждениями сухожильной сгибателей пальцев. Методы: выполнены расчеты изменения напряжения в анатомических зонах аннулярных связок и местах прикрепления сухожильной поверхностного и глубокого сгибателей пальца в зависимости от углов сгибания в межфаланговых суставах. С использованием метода конечных элементов построены три модели: 1 — с интактными сухожилиями поверхностного и глубокого сгибателей, 2 — с поврежденным сухожилием поверхностного сгибателя, 3 — с поврежденным сухожилием глубокого сгибателя. Выполнены расчеты НДС структур сгибательного аппарата пальцев кисти. Результаты: доказано, что при отсутствии сухожилия поверхностного сгибателя при межсегментарных углах сгибания от 0° до 70° напряжение в дистальных точках крепления сухожилия глубокого сгибателя и аннулярных связок  $A_3$  и  $A_2$  увеличивается с максимальными значениями при сгибании 70°. Предложен метод двухэтапной пластики сухожилия глубокого сгибателя с сохранением поверхностного (патент Украины № 85349). Выводы: в условиях стандартной нагрузки на сгибательный аппарат пальцев кисти при изолированных повреждениях сухожилия глубокого сгибателя целесообразно сохранять сухожилие поверхностного сгибателя для предотвращения перенапряжения в дистальной точке прикрепления сухожилия глубокого сгибателя, а также связочный аппарат пальца (аннулярные связки  $A_1$ – $A_2$ ). Ключевые слова: сухожилие, поверхностный и глубокий сгибатели, критическая зона, аннулярные связки, изолированное повреждение, напряжение, деформации.*

**Ключові слова:** сухожилок, поверхневий і глибокий згинач, критична зона, аннулярні зв'язки, ізольоване ушкодження, напруження, деформації

## Вступ

Відомо, що ушкодження сухожилків згиначів у II зоні є складними в лікуванні й залишаються в центрі уваги клінічних та інструментальних досліджень.

Незважаючи на те, що протягом останніх десятиріч накопичено значний клінічний досвід лікування хворих з ушкодженнями сухожилків згиначів пальців кисті, залишається низка невіршених тактичних і технологічних проблем [1–5]. Відсутність уніфікованої тактики лікування є однією з передумов виникнення ускладнень, особливо на первинних етапах надання допомоги. Зокрема, незадовільні результати після відновлення сухожилків згиначів становлять 3–18 % у разі ізольованих ушкоджень та 38–62 % за поліструктурної травми кисті, що зумовлено анатомічними особливостями сухожилків згиначів у критичній зоні [1].

Невіршеним питанням залишається тактика видалення сухожилка поверхневого згинача під час відновлення ізольованих ушкоджень сухожилка глибокого згинача в критичній зоні [1–4, 6]. Деякі автори в таких випадках вважають необхідним зберігати сухожилок поверхневого згинача [1, 5].

Кисть є складною системою, в якій на кожному рівні підтримується рівновага між згинальним та розгинальним апаратами. У разі порушення рівноваги цього кінематичного ланцюга, а саме вилучення неушкодженого сухожилка поверхневого згинача та відновлення сухожилка глибокого згинача, збільшується навантаження на відновлені сухожилки [1, 3, 7]. За результатами біомеханічного експерименту та комп'ютерного моделювання було доведено, що у випадку ізольованого ушкодження сухожилка поверхневого згинача порушується координація рухів в дистальному міжфаланговому суглобі [7].

Сучасний стан хірургічного відновлення сухожилків згиначів пальців кисті в критичній зоні

свідчить про необхідність подальшого вивчення біомеханіки згинального апарату пальців та обґрунтування тактики хірургічного лікування хворих із зазначеними ушкодженнями.

*Мета дослідження:* на підставі біомеханічних та математичних досліджень проаналізувати напружено-деформований стан згинального апарату пальців кисті для обґрунтування тактики лікування хворих з ізольованим ушкодженням сухожилків згиначів пальців кисті.

## Матеріал та методи

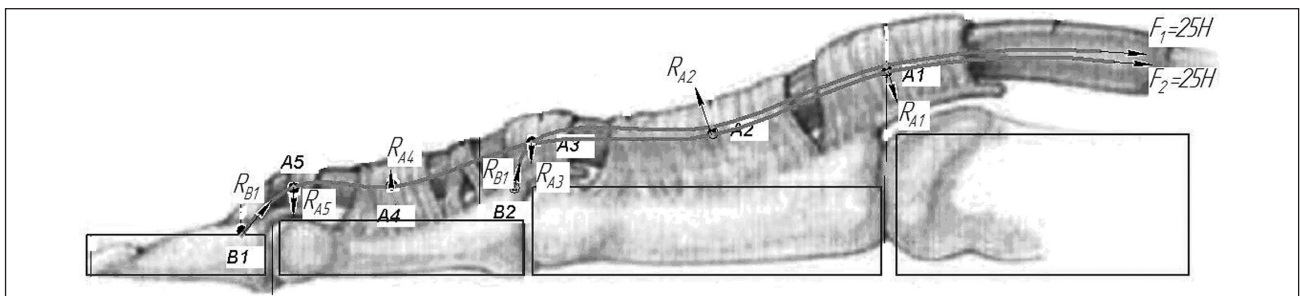
Застосовано аналітичний метод для визначення реакцій тканин у дистальних точках кріплення сухожилків згиначів та анулярних зв'язок на дію сил, які виникають у сухожилковому каналі згинального апарату пальців кисті. Для числових розрахунків використана загальна схема (рис. 1).

З метою перевірки адекватності аналітичних розрахунків проведено кінцево-елементний аналіз напружено-деформованого стану структур згинального апарату пальців кисті в умовах інтактного сухожилка глибокого згинача за умов ушкодження сухожилка поверхневого.

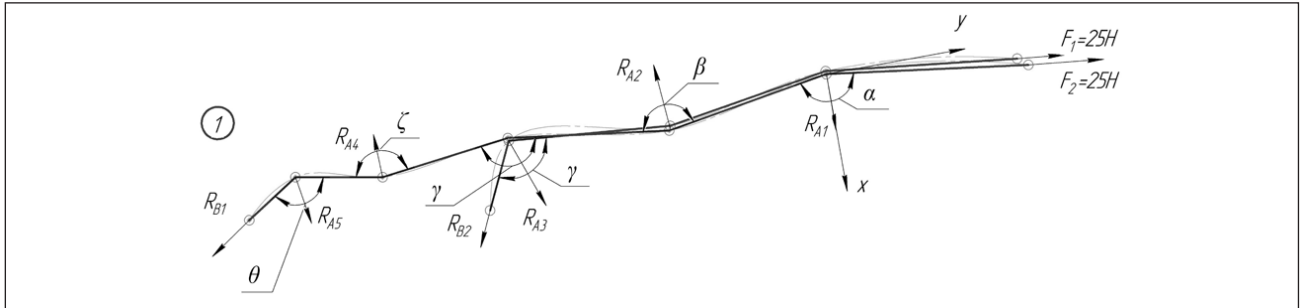
За допомогою програмного пакета КОМПАС-3D (V12) побудована 3D модель сухожилка глибокого згинача пальця. Для подальших розрахунків 3D модель імпортували в середовище ANSYS для визначення напружено-деформованого стану. Засобами ANSYS згенеровано кінцево-елементну сітку, яка налічувала 29 361 точку та 6 055 елементів.

Вивчено перерозподіл зусиль у разі згинання з ушкодженого сухожилка поверхневого згинача пальця на сухожилок глибокого згинача в умовах прикладення сили 50 Н на проксимальний кінець сухожилка.

На завершальному етапі достовірність розрахунків отриманих кінцево-елементним моделюванням перевірено аналітичними розрахунками.



**Рис. 1.** Загальна розрахункова схема згинального апарату пальця.  $A_1$ – $A_5$  — точки центру відповідних анулярних зв'язок;  $B_1$ – $B_2$  — точки кріплення відповідно сухожилків глибокого та поверхневого згиначів пальців;  $F_1$ – $F_2$  — сили, які прикладені до проксимальних відділів сухожилка глибокого та поверхневого згиначів пальців відповідно;  $R_{B1}$  — реакція на дію сили  $F_1$  у дистальній ділянці прикріплення сухожилка глибокого згинача пальця;  $R_{B2}$  — реакція на дію сили  $F_2$  у дистальній ділянці прикріплення сухожилка поверхневого згинача пальця;  $R_{A1,2,3,4,5}$  — реакції в точках  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  і  $A_5$  відповідно



**Рис. 2.** Схема міжсегментарних кутів та реакцій від сили натягу інтактних сухожилків глибокого та поверхневого згиначів пальця в системі координат XOY

Результати математичних розрахунків взяті з попередньої роботи [3].

На лікуванні у відділенні мікрохірургії та реконструктивно-відновлювальної хірургії верхньої кінцівки ІТО НАМН в період з 2011 по 2014 рр. перебували 54 пацієнти з ушкодженням сухожилів згиначів пальців кисті в критичній зоні, з них 27 (50 %) з ізольованим ушкодженням сухожилів глибоких згиначів. Чоловіків було 39 (72,2 %), жінок 15 (27,8 %), середній вік хворих ( $33,7 \pm 5,3$ ) року. Ушкодження правої кисті відбулося у 36 (66,7 %) випадках, лівої — у 18 (33,3 %).

Функцію верхньої кінцівки оцінювали за шкалою DASH та методикою Strickland.

**Результати та їх обговорення**

Аналіз реакцій на дію сили скорочення м’язів поверхневого та глибокого згиначів пальця залежно від кута згинання в міжфалангових та п’ястково-фаланговому суглобах здійснювали окремо для кожної з побудованих моделей. До проксимальних кінців сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця прикладали однакову силу по 25 Н. За умов ушкодження одного з сухожилків уцілілий сухожилок отримував подвійне навантаження — 50 Н. На рис. 1 стрілками показано вектори дії сил на сухожилки згиначів пальця. Для розрахунку сили дії на анулярні зв’язки напрямком вектору сили змінювали на протилежний зі знаком «мінус» відповідно до третього закону Ньютона (сили, які виникають у процесі взаємодії двох тіл, є рівними за модулем і протилежними за напрямком).

Визначали реакції в шарнірних опорах залежно від сили натягу кожного сухожилка в точках  $A_1$ – $A_5$ , та  $B_1$ ,  $B_2$  відповідно для варіанту інтактних сухожилків. Для цього будували для кожної точки власну систему координат XOY (рис. 2). Вісь X відповідає напрямку реакції, яка діє у відповідній точці.

Відповідно до схеми (рис. 2) величини кутів ( $\beta$  та  $\zeta$ ) кривини сухожилкового каналу основної та

середньої фаланг залишаються незмінними, незважаючи на обсяг міжфалангових рухів.

Для варіанту інтактних сухожилків за умов дії сил  $F_1 = 25$  Н та  $F_2 = 25$  Н результати, отримані шляхом математичних обчислень залежно від кутів згинання в міжфалангових та п’ястково-фаланговому суглобах, наведені у табл. 1.

Згідно з отриманими результатами за умов згинання до кута  $10^\circ$  зусилля на всі зв’язки, крім  $A_3$ , знижуються практично до нульових значень. Зі збільшенням кута згинання зусилля наростають для зв’язки  $A_1$  і менше наростають для  $A_5$ . На зв’язці  $A_2$  зусилля не підвищувалися, а на зв’язці  $A_3$  зменшувалися до кута згинання  $45^\circ$ , а за його значення  $70^\circ$  знову збільшувалися.

Відповідно до умов моделі 2 визначали реакції на дію сили від натягу інтактного сухожилка глибокого згинача в точках  $A_1$ – $A_5$  та  $B_1$ . Для цього будували відносно кожної точки власну систему координат XOY (рис. 3). Вісь X відповідає напрямку реакції, яка діє у відповідній точці.

Для варіанту дії сил  $F_1 = 50$  Н та  $F_2 = 0$  Н результати, отримані шляхом математичних розрахунків залежно від кутів згинання в міжфалангових та п’ястково-фаланговому суглобах, наведені у табл. 2.

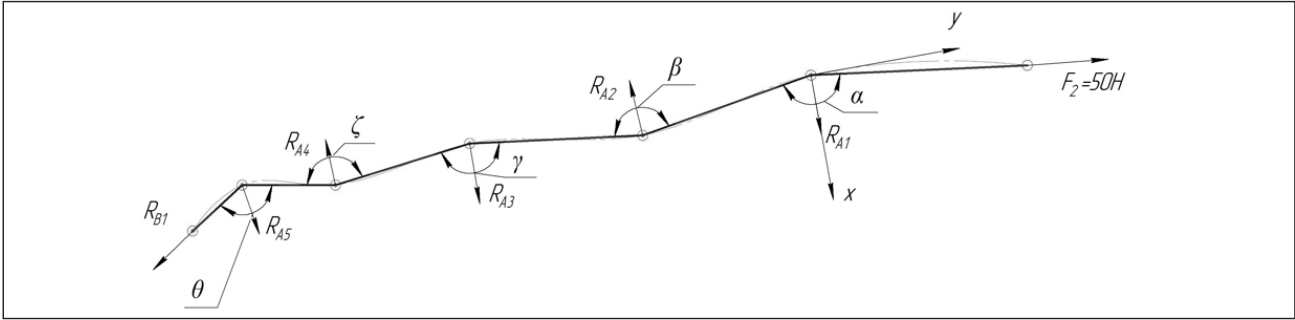
Згідно з отриманими показниками в разі згинання до кута  $10^\circ$  зусилля на зв’язки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_4$

Таблиця 1

**Розподіл зусиль, які виникають на анулярних зв’язках та містах кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця під впливом сили скорочення м’язів, Н (модель 1)**

Кут згинання, градуси	$R_{B1}$	$R_{B2}$	$R_{A1}$	$R_{A2}$	$R_{A3}$	$R_{A4}$	$R_{A5}$
0	25,0	25,0	4,4	6,5	13,6	1,1	4,3
10			0,0	0,0	9,5	0,0	2,2
45			15,0	0,0	5,3	0,0	5,4
70			25,0	0,0	15,6	0,0	10,6

Примітка.  $R_{A1}$ – $R_{A5}$  — зусилля, які виникають на анулярних зв’язках  $A_1$ – $A_5$ .



**Рис. 3.** Схема міжсегментарних кутів та реакцій від сили натягу ізолюваного сухожилка глибокого згинача пальця в системі координат XOY

знижуються практично до нульових значень. Зі збільшенням кута згинання зусилля наростають для зв'язок  $A_1, A_2, A_3$ : найбільше для  $A_3$ , найменше для  $A_5$ . На зв'язках  $A_2, A_4$  зусилля не наростали.

З таблиць видно, що в разі згинання фаланг пальця зусилля в точках  $A_1, A_3$  і  $A_5$  збільшуються. Це пояснюється тим, що кути в міжфалангових суглобах зменшуються, а косинуси цих кутів відповідно зростають. Навантаження на сухожилки відрізняються залежно від кута згинання в міжфалангових та п'ястково-фалангових суглобах. Ці значення навантажень можуть змінюватись у декілька разів.

Доведено, що в разі ушкодження одного із сухожилків інший компенсаторно сприймає навантаження, яке зростає у 1,5–2 рази, що може призвести до перевищення межі міцності анулярної зв'язки або сухожилка та викликати їх руйнування за надмірних навантажень. Встановлено, що у випадку ушкодження сухожилка поверхневого згинача пальців кисті реакція в центрі анулярних зв'язок проксимального міжфалангового суглоба ( $A_3$ ) зростає в 1,5 рази порівняно з нормою, а дистального ( $A_5$ ) — в 2 рази (за кутів згинання  $70^\circ$ ) для моделей 1 і 2, а в центрі анулярної зв'язки середньої фаланги ( $A_4$ ) збільшується в 2 рази, однак у разі згинання знижується до 0 та лишається сталою для обох моделей.

У ділянці анулярної зв'язки  $A_1$  реакція поступово збільшується в 6 разів, а в зоні зв'язки  $A_2$  наближується до 0 в разі зміни кутів згинання та зберігається незмінною для обох моделей.

Наведені обчислення допомагають врахувати зусилля в потрібних точках для будь-якого міжсегментарного кута.

У результаті кінцево-елементного моделювання отримано показники напружено-деформованого стану структур згинального апарата пальців кисті. Зокрема, у разі прикладання подвійного зусилля 50 Н на проксимальний кінець сухожилка глибокого згинача (модель 2) максимальні напруження 15,23 МПа спостерігають у ділянці прикріплення

сухожилка до дистальної фаланги пальця, що за умов надмірних навантажень може призводити до ушкодження з відривом сухожилка від місця прикріплення. По довжині сухожильного каналу піки напружень та деформацій з'являються в ділянках міжфалангових суглобів. Переміщення закономірно збільшуються з віддаленням від ділянки прикріплення сухожилка в проксимальному напрямку.

Достовірність кінцево-елементних розрахунків напружень перевірено аналітично за допомогою розрахункової схеми (рис. 4).

Отримані розрахунки напружень у різних ділянках згинального апарата пальців кисті представлені в табл. 3. У результаті розрахунку отримали показники напруження для ділянки  $R_{B1}$ , які дорівнюють  $\approx 50/3 = 16,7$  МПа.

Порівнюючи результати розрахунків напруження в точці  $R_{B1}$  (15,21 МПа), отримані кінцево-елементним методом, з результатами аналітичних розрахунків  $R_{B1}$  (16,7 МПа), виявлено майже аналогічні показники, які відрізняються на 8,8%. З цього можна зробити висновок, що проведені розрахунки є достовірними та відповідають дійсності.

Наявність дефекту анулярних зв'язок або відсутність сухожилка поверхневого згинача обумовлює збільшення навантаження на цілі елементи та призводить до порушення функції.

Згідно з проведеними біомеханічними дослідженнями стає очевидним необхідність збереження

**Таблиця 2**  
Аналіз реакцій в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місці кріплення сухожилка глибокого згинача пальця на дію сили скорочення м'язів, Н (модель 2)

Кути згинання, градуси	$R_{B1}$	$R_{B2}$	$R_{A1}$	$R_{A2}$	$R_{A3}$	$R_{A4}$	$R_{A5}$
0	50,0	0,0	4,4	6,5	2,2	2,2	8,7
10			0,0	0,0	2,2	0,0	4,4
45			15,0	0,0	17,1	0,0	10,8
70			25,0	0,0	26,9	0,0	21,1



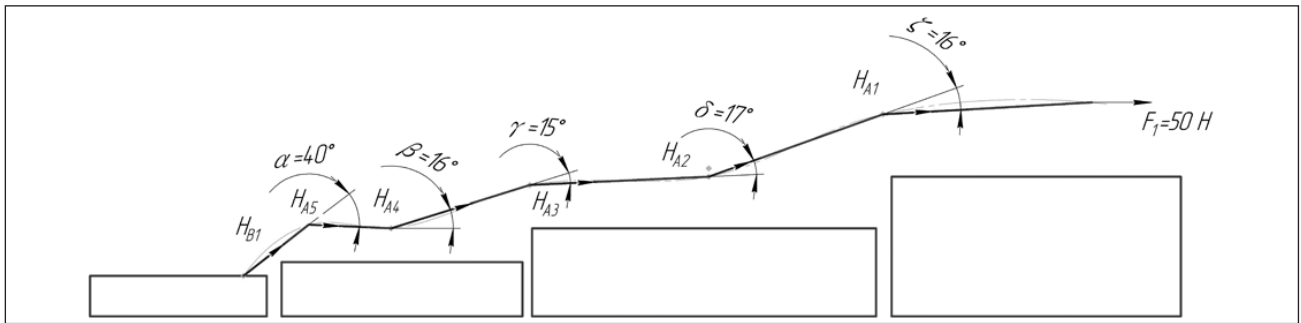


Рис. 4. Розрахункова схема

або відновлення структур згинального апарата пальців кисті під час реконструктивно-відновлювальних операцій, а саме анулярних зв'язок  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_5$ . На підставі результатів про зміну напруження в точках фіксації, деформації та переміщення ми запропонували метод двохетапної пластики сухожилка глибокого згинача із збереженням сухожилка поверхневого згинача (патент України № 85249) [9], у якому враховано більшість визначених експериментально факторів, досягнуто рівномірне навантаження на всі елементи згинального апарата, що є передумовою покращення функціональних результатів лікування. Запропонований метод пластики дає змогу максимально ефективно зберегти анатомічну структуру згинального апарата пальців кисті та отримати хороші функціональні результати лікування хворих.

Проведені дослідження стали основою хірургічного лікування 54 пацієнтів з ушкодженням сухожилків згиначів пальців кисті. В основній групі (27 хворих) прооперовано 49 пальців з приводу відновлення сухожилків згиначів методом двохетапної пластики зі збереженням сухожилка поверхневого згинача. Термін виконання першої операції коливався від 0,3 до 227 тижнів після травми. Деякі пацієнти вже отримали медичну допомогу: ПХО — 9 (33,3%), ПХО та шов сухожилків — 7 (26%). До лікаря не зверталися 11 (40,7%) осіб.

Методом двохетапної пластики без збереження сухожилка поверхневого згинача пролікували 27 пацієнтів (34 пальця) контрольної групи. Термін виконання першої операції коливався від 1 до 14 тижнів після травми. Деякі постраждали вже отримували

медичну допомогу: ПХО — 11 (40,7%), ПХО та шов сухожилків — 22 (81,5%). Не зверталися до фахівців 4 (14,8%) хворих. У більшості хворих, яким раніше виконали ПХО та шви сухожилків, виявлені рубцеві дефекти шкіри та комбіновані контрактури суглобів ушкоджених пальців. Водночас у пацієнтів, яким виконали лише щадну обробку рани, навіть у випадках застарілої травми, таких ускладнень не визначали.

У пацієнтів основної групи на трьох пальцях відновлено зв'язки  $A_1$  та  $A_5$ . У хворих контрольної групи на чотирьох пальцях (з тотальним ушкодженням зв'язкового апарата) виконано вибіркоче відновлення зв'язок  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_5$  та на п'яти пальцях —  $A_1$  та  $A_3$ .

Як в ранньому, так і у віддаленому періодах незадовільних результатів лікування не виявлено.

## Висновки

Проведені розрахунки свідчать про те, що у випадках ізольованого ушкодження сухожилка поверхневого згинача збільшується напруження в дистальних точках фіксації сухожилка глибокого згинача і зв'язкового апарата пальця ( $A_1$ ,  $A_3$ – $A_5$ ), що призводить до перенавантаження зони шва після відновлення сухожилка глибокого згинача та анулярних зв'язок.

Шляхом біомеханічного експерименту доведено, що в разі надання надмірного навантаження за умови функціонування сухожилка глибокого згинача підвищується ризик його ушкодження.

Проведені розрахунки доводять, що за можливості необхідно зберігати сухожилок поверхневого згинача під час виконання двохетапної пластики сухожилка глибокого згинача пальця та обов'язково проводити відновлення зв'язкового апарата сухожилків згиначів пальців кисті.

Результати клінічних обстежень хворих після хірургічного лікування свідчать про високу ефективність двохетапної сухожилкової пластики згиначів у разі їх ізольованого ушкодження.

Таблиця 3

Сили (Н) та напруження (МПа) в різних ділянках згинального апарата пальця кисті

$H_{B1}$	$H_{A5}$	$H_{A4}$	$H_{A3}$	$H_{A2}$	$H_{A1}$
Сила, Н					
50,00	38,30	39,85	38,49	40,25	38,69
Напруження, МПа					
16,67	12,77	13,28	12,83	13,42	12,90

**Список літератури**

1. Безуглий А. А. Профілактика, діагностика та лікування ускладнень після відновлення сухожилля згиначів пальців кисті в «критичній зоні»: дис. ... канд. мед. наук: 14.02.21 / Артур Анатолійович Безуглий. — Київ, 2010. — 174 с.
2. Розподіл зусиль у різних ділянках згинального апарату пальців кисті при стандартному навантаженні / І. А. Лазарев, І. М. Курінний, М. Л. Ярова, М. В. Скибан // Травма. — 2013. — № 6 (14). — С. 73–82.
3. Ломая М. П. Двухэтапная тендопластика при застарелых повреждениях сухожилий сгибателей пальцев кисти с применением активных силиконовых сухожильных эндопротезов / М. П. Ломая // Ортопедия и травматология России. — 2007. — № 3 (45). — С. 68–72.
4. Ліпська О. А. Епідеміологічні особливості травм кисті та методи оцінки результатів реабілітаційного втручання / О. А. Ліпська // Фізичне виховання, спорт і культура здоров'я у сучасному суспільстві: збірник наукових праць. — 2012. — № 2 (18). — С. 240–244.
5. Щербаков М. А. Оптимизация способов пластики сухожиль сгибателей II–IV пальцев кисти при их повреждениях в зоне костно-фиброзного канала: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.22 / Михаил Александрович Щербаков. — Саратов, 2009. — 84 с.
6. Abdul-Kader M. H. Two-stage reconstruction for flexor tendon injuries in zone II using a silicone rod and pedicled sublimis tendon graft / M. H. Abdul-Kader, M. A. Amin // Indian J. Plast. Surg. — 2010. — Vol. 43 (1) — P. 14–20, doi: 10.4103/0970-0358.63944.
7. Гринягин И. В. Компьютерная диагностика двигательной активности пальцев руки человека на основе биомеханического моделирования: дис... канд. мед. наук: 03.01.09 / Иван Владимирович Гринягин. — М., 2011. — 170 с.
8. Two-stage flexor tendon reconstruction in zone II, using Hunter's technique / S. Sun, Y. Ding, B. Ma, Y. Zhou // Orthopedics. — 2010. — Vol. 33 (12). — P. 880, doi: 10.3928/01477447-20101021-10.
9. Пат. № 85249 Україна МПК А61В 17/56 (2006.01). Спосіб виконання двохетапної пластики сухожилків глибоких згиначів пальців кисті у критичній зоні / С. С. Страфун, А. А. Безуглий; В. В. Гайович, М. Л. Ярова; заявник та патентовласник ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України». — № u201307141; заявл. 06.06.2013; опубл. 11.11.2013; Бюл. № 21.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-59872014420-25>

Стаття надійшла до редакції 29.08.2014

---

## BIOMECHANICAL SUBSTANTIATION FOR TACTICS OF SURGICAL TREATMENT IN CASES OF FLEXOR TENDONS OF THE HAND FINGERS DAMAGE IN THE «CRITICAL» ZONE

I. M. Kurinny, I. A. Lazarev, M. L. Yarova, M. V. Skyban

SI «Institute of Traumatology and Orthopedics, National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv