

УДК 616.717.9-018.38-001-089.844:612.76

ЛАЗАРЕВ І.А., КУРІННИЙ І.М., ЯРОВА М.Л., СКИБАН М.В.
ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ

РОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ У РІЗНИХ ДІЛЯНКАХ ЗГИНАЛЬНОГО АПАРАТУ ПАЛЬЦІВ КИСТІ ПРИ СТАНДАРТНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Резюме. Використання методу двоетапної пластики зі збереженням сухожилка поверхневого згинача дозволяє знизити навантаження на зв'язковий апарат сухожилка глибокого згинача, уникнути виникнення згинальних контрактур та функціональної недостатності згинання пальця.

При проведенні біомеханічного експерименту — моделювання напружено-деформованого стану елементів згинального апарату пальців кисті — сухожилка поверхневого згинача, сухожилка глибокого згинача, зв'язок пальців кисті, фаланг пальців кисті досліджувалися 3 моделі: з функціонуючими сухожилками поверхневого і глибокого згиначів, із функціонуючим сухожилком глибокого згинача, з функціонуючим сухожилком поверхневого згинача.

Встановлено, що напруження в дистальних точках кріплення сухожилка глибокого згинача й анулярних зв'язок проксимальних та дистальних міжфалангових суглобів збільшується за відсутності сухожилка поверхневого згинача з максимальними значеннями при межсегментарних кутах згинання 70°.

На основі проведених розрахунків виявлено закономірності розподілу зусиль на згинальний апарат пальців кисті та констатовано, що у випадках ізольованого пошкодження сухожилка глибокого згинача доцільно зберігати сухожилок поверхневого згинача з метою запобігання перенапруженню в дистальній точці фіксації сухожилка глибокого згинача і зв'язкового апарату пальця.

Ключові слова: сухожилок поверхневого згинача, сухожилок глибокого згинача, критична зона, анулярні зв'язки, ізольоване ушкодження, напруження й деформації.

Вступ

Незважаючи на значні успіхи хірургії сухожилків у цілому, незадовільні результати після відновлення сухожилків згиначів становлять 3–18 % при ізольованих ушкодженнях та 38–62 % при поєднаній травмі кисті, що зумовлено стійкою тенденцією до підвищення тяжкості травми кисті, недостатнім та неякісним лікуванням [8].

Травми сухожилків згиначів у II зоні найбільш важко піддаються лікуванню й залишаються в центрі уваги як клінічних, так і інструментальних досліджень. Відновлення функції сухожилків згиначів пальців кисті в II зоні є одним із найважчих розділів реконструктивно-відновної хірургії кисті. Накопичено значний клінічний досвід лікування хворих з ушкодженнями сухожилків згиначів пальців кисті [1–3, 8, 9, 12, 15]. Наразі більшість авторів схиляються до думки, що при ізольованих ушкодженнях сухожилка глибокого згинача в критичній зоні необхідно видаляти сухожилок поверхневого згинача [2, 5, 7, 12]. Але існує й думка про доцільність його збереження [1, 6].

У наш час залишається цілий ряд невирішених проблем як тактичного, так і технологічного плану

[10]. Такою проблемою є й способи шва сухожилків у критичній зоні, які не передбачають збереження сухожилка поверхневого згинача, оскільки за загальноприйнятою методикою при ізольованому пошкодженні сухожилків глибоких згиначів або при їх поєднаному пошкодженні із сухожилком поверхневих згиначів 2–5-го пальців у критичній зоні виконується сухожилна пластика сухожилка глибокого згинача з видаленням дистального кінця сухожилка поверхневого згинача [12].

Кисть є кінематичним ланцюгом, що на кожному рівні урівноважується подвійною м'язово-сухожилковою системою, і ушкодження однієї з його ланок призводить до дисбалансу. У зв'язку з цим сухожилок поверхневого згинача не має висікатися або залишатися ушкодженим [1, 6]. Доведено, що при ізольованому ушкодженні сухожилка поверхневого згинача порушується координація рухів у дистальному міжфаланговому суглобі [4]. При таких

© Лазарев І.А., Курінний І.М., Ярова М.Л., Скибан М.В., 2013

© «Травма», 2013

© Заславський О.Ю., 2013

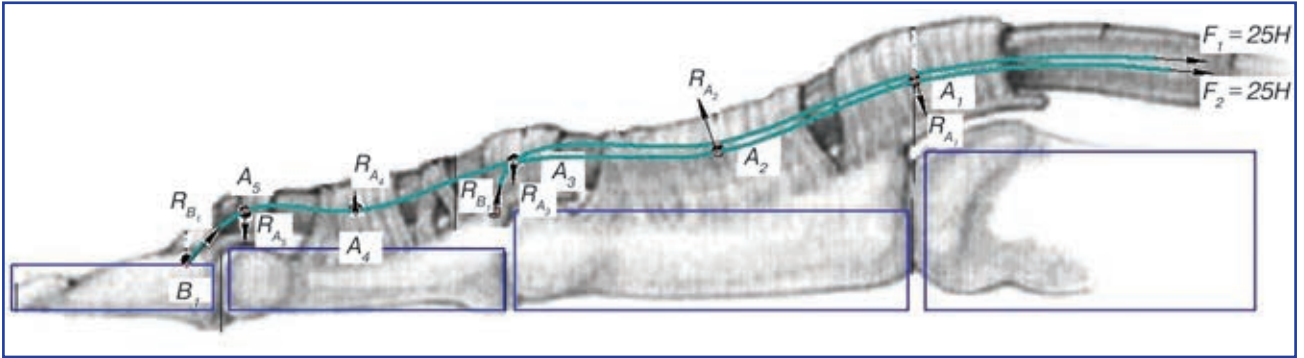


Рисунок 1. Загальна розрахункова схема згинального апарату пальця: A_1 — точка центру анулярної зв'язки ділянки п'ясно-фалангового суглоба; A_2 — точка центру анулярної зв'язки основної фаланги; A_3 — точка центру анулярної зв'язки проксимального міжфалангового суглоба; A_4 — точка центру анулярної зв'язки середньої фаланги; A_5 — точка центру анулярної зв'язки дистального міжфалангового суглоба; B_1 — точка кріплення сухожилка глибокого згинача пальця; B_2 — точка кріплення сухожилка поверхневого згинача пальця; F_1 — сила, що прикладена до проксимального відділу сухожилка глибокого згинача пальця; F_2 — сила, що прикладена до проксимального відділу сухожилка поверхневого згинача пальця; R_{B_1} — реакція на дію сили F_1 у дистальній ділянці прикріплення сухожилка глибокого згинача пальця; R_{B_2} — реакція на дію сили F_2 у дистальній ділянці прикріплення сухожилка поверхневого згинача пальця; $R_{A_1}, R_{A_2}, R_{A_3}, R_{A_4}, R_{A_5}$ — реакції в точках A_1, A_2, A_3, A_4 і A_5 відповідно.

ушкодженнях метод двохетапної пластики сухожилків згиначів пальців кисті є найбільш ефективним для досягнення добрих функціональних результатів [1, 6].

Усе вищевикладене свідчить про необхідність подальшого вивчення комплексу згинальної системи пальців кисті та пошуків наукового обґрунтування питань тактики оперативного лікування та післяопераційної реабілітації хворих з ушкодженнями сухожилків пальців кисті, особливо в критичній зоні.

Мета дослідження: математичний розрахунок показників сил, що діють на анатомічні ділянки згинального апарату пальців кисті при стандартному навантаженні на проксимальні кінці сухожилків згиначів пальців, та аналіз напружено-деформованого стану в зазначених ділянках.

Матеріали та методи

Визначення реакцій на дію сил, які виникають в сухожильному каналі згинального апарату пальців кисті, здійснювали аналітичним методом. Для

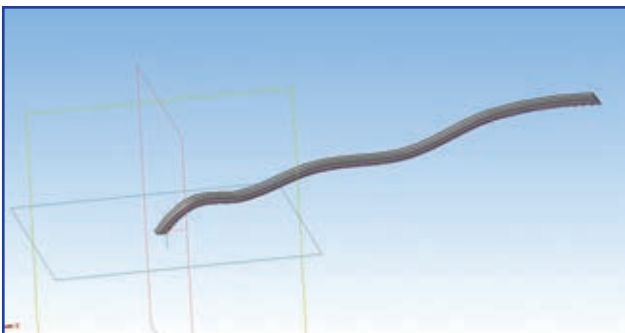


Рисунок 2. 3D-модель сухожилка глибокого згинача пальця

чисельних розрахунків використовували загальну схему (рис. 1).

Для розрахунків були прийняті такі спрощення:

- між сухожилками та всіма контактуючими елементами тертя відсутнє;
- міжфалангові та п'ясно-фалангові суглоби пальця відіграють роль роликів підшипника.

Для перевірки адекватності аналітичних розрахунків був проведений скінченно-елементний аналіз напружено деформованого стану структур згинального апарату пальців кисті в умовах інтактного



Рисунок 3. Кінцево-елементна сітка

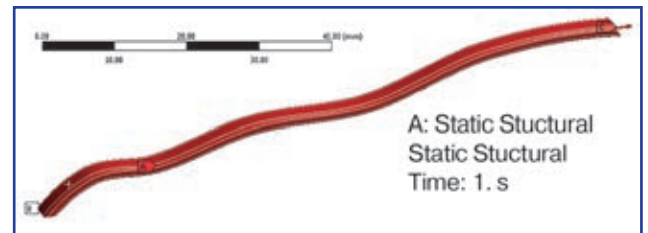


Рисунок 4. Розрахункова модель: **A** — обмеження, що утримують сухожилок у каналі; **B** — місце прикріплення сухожилка до дистальної фаланги пальця; **C** — місце прикладання сили 50 Н (м'язова тяга)

сухожилка глибокого згинача при пошкодженні сухожилка поверхневого згинача.

За допомогою програмного пакета «Компас-3D» (V12) побудована 3D-модель сухожилка глибокого згинача пальця (рис. 2).

На наступному етапі 3D-модель імпортована в середовище ANSYS для проведення розрахунків та визначення напружено-деформованого стану. Засобами ANSYS згенерована кінцево-елементна сітка (рис. 3), що налічувала 29 361 точку та 6055 елементів.

На рис. 4 зображена розрахункова модель сухожилка глибокого згинача пальця з умовами закрі-

плення та дії зовнішніх сил. Прикладанням сили 50 Н на проксимальний кінець сухожилка змодельовані умови компенсаторного переключення функції згинання пальця з пошкодженого сухожилка поверхневого згинача пальця на сухожилок глибокого згинача.

На завершальному етапі вірогідність розрахунків, отриманих кінцево-елементним моделюванням, перевірена аналітичними розрахунками.

Результати та їх обговорення

Аналіз реакцій на дію сили скорочення м'язів поверхневого та глибокого згиначів пальця залеж-

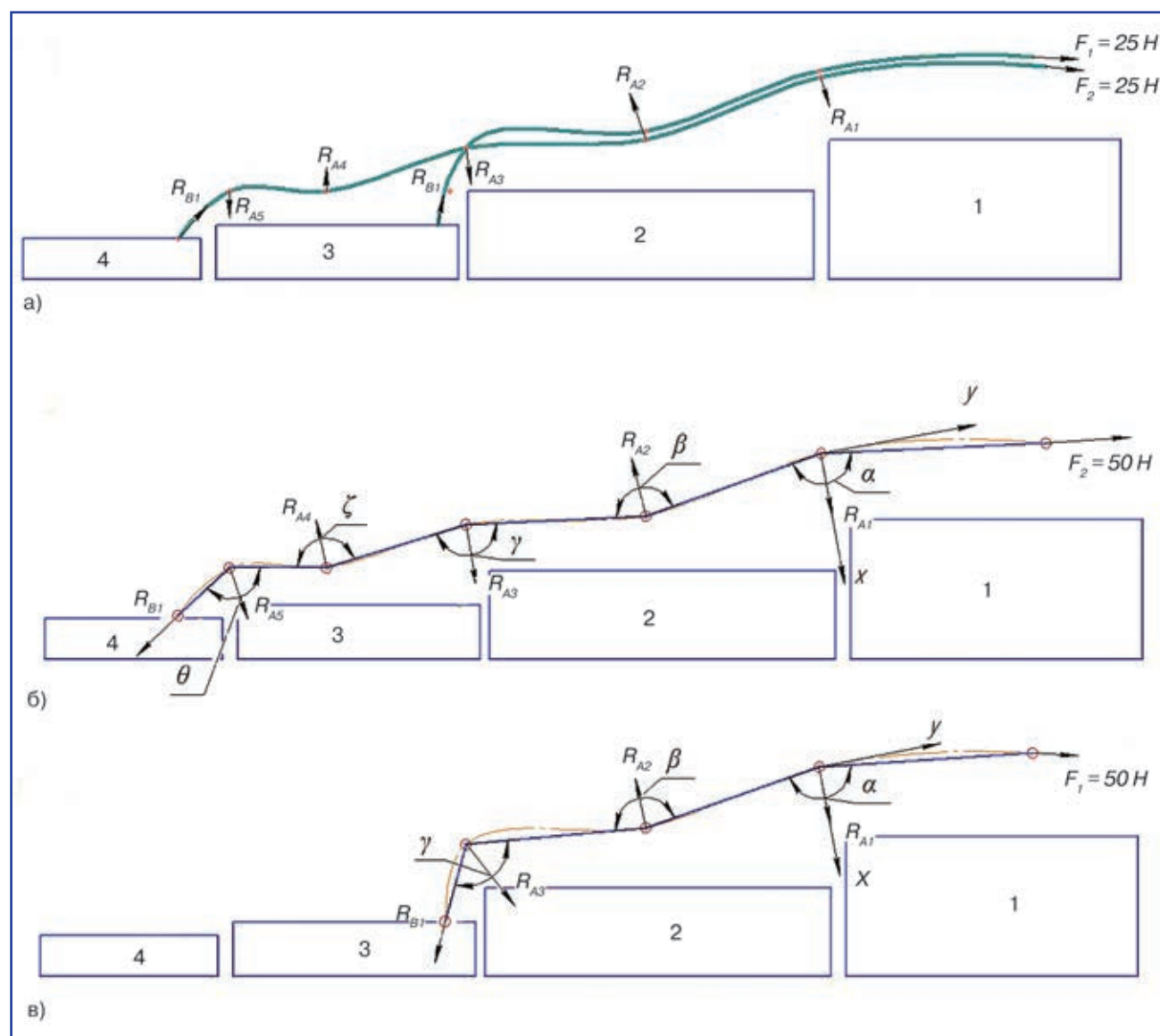


Рисунок 5. Розрахункові схеми з векторами дії сил для трьох варіантів аналізу: а) палець із двома інтактними сухожилками; б) палець з ушкодженням сухожилка поверхневого згинача; в) палець з ушкодженням сухожилка глибокого згинача; 1 – п'ясна кістка; 2 – проксимальна фаланга; 3 – середня фаланга; 4 – дистальна фаланга. R – вектори сил, що діють на сухожилки та зв'язковий апарат; F – сила, що діє на проксимальні кінці сухожилків; кут α – кут згинання в п'ясно-фаланговому суглобі; кут β – кут кривини сухожильного каналу основної фаланги; кут γ – кут згинання в проксимальному міжфаланговому суглобі; кут ζ – кут кривини сухожильного каналу середньої фаланги; кут θ – кут згинання в дистальному міжфаланговому суглобі

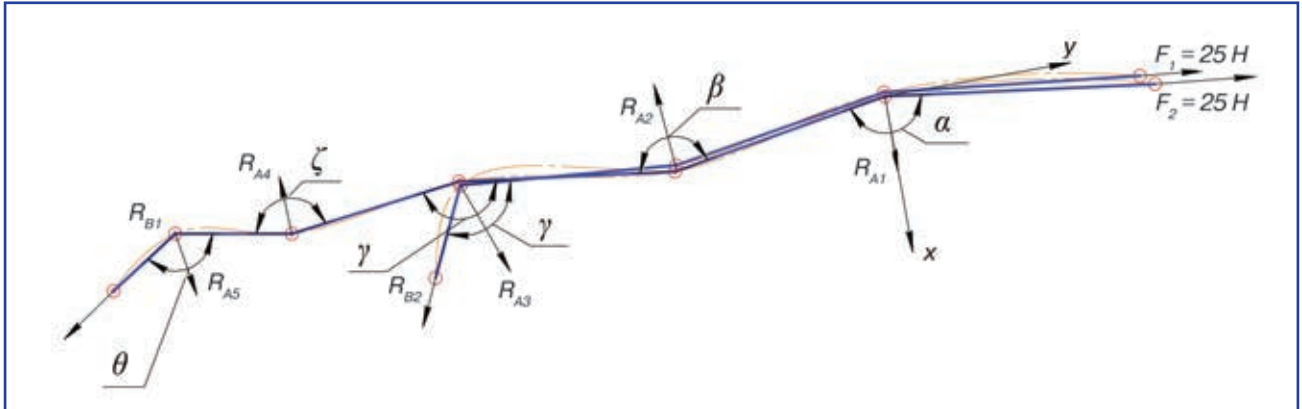


Рисунок 6. Схема міжсегментарних кутів та реакцій залежно від сили натягу інтактних сухожилків глибокого та поверхневого згиначів пальця в системі координат XOY

но від кута згинання в міжфалангових та п'ясно-фаланговому суглобах здійснювали за умов, поданих на рис. 5.

На проксимальні ділянки сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця прикладали силу $F_1 = 25$ Н та $F_2 = 25$ Н відповідно. У випадках пошкодження одного із сухожилків для виконання тієї ж роботи на інтактний сухожилок мають прикладатися більші зусилля. У нашому випадку прикладали компенсуючу силу — 50 Н. Стрілками показано вектори дії сил на сухожилки згиначів пальця. Для розрахунку сили дії на анулярні зв'язки напрямок вектора сили змінюється на протилежний зі знаком «мінус» відповідно до третього закону Ньютона — сили, що виникають при 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_2, A_3, A_4 і A_5 та B_1, B_2 відповідно для варіанта інтактних сухожилків (рис. 5а). Для цього будували відносно кожної точки власну систему координат XOY (рис. 6). Вісь X відповідає напрямку реакції, що діє у відповідній точці.

Відповідно до схеми (рис. 6), величини кутів (β та ζ) кривини сухожилкового каналу основної та середньої фаланг залишаються незмінними, незважаючи на об'єм міжфалангових рухів.

Значення реакцій для точок A_1, A_2, A_3 підсумовуються, і дорівнюють:

$$\begin{aligned} R_{A1} &= F_1 \cos(\alpha_1/2) + F_2 \cos(\alpha_2/2), \\ R_{A2} &= F_1 \cos(\beta_1/2) + F_2 \cos(\beta_2/2), \\ R_{A3} &= F_1 \cos(\gamma_1/2) + F_2 \cos(\gamma_2/2). \end{aligned}$$

Для варіанта інтактних сухожилків при дії сил $F_1 = 25$ Н та $F_2 = 25$ Н значення, отримані залежно від кутів згинання у міжфалангових та п'ясно-фаланговому суглобах, наведені в табл. 1.

На рис. 7 подано графік залежності величини напруження в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого-

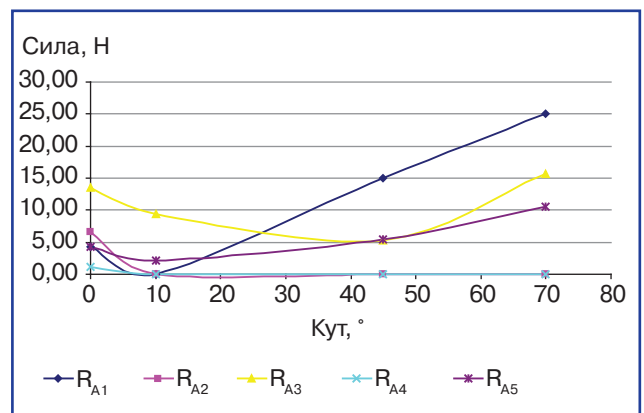


Рисунок 7. Залежність величини напруження в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель 1)

Таблиця 1. Розподіл зусиль, що виникають на анулярних зв'язках та місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця, у відповідь на дію сили скорочення м'язів, Н

Кути згинання, °	R_{B1}	R_{B2}	R_{A1}	R_{A2}	R_{A3}	R_{A4}	R_{A5}
0	25,00	25,00	4,36	6,53	13,59	1,09	4,34
10			0,00	0,00	9,48	0,00	2,18
45			15,03	0,00	5,28	0,00	5,41
70			25,00	0,00	15,61	0,00	10,56

Примітка: $R_{A1}, R_{A2}, R_{A3}, R_{A4}, R_{A5}$ — зусилля, що виникають на анулярних зв'язках A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 .

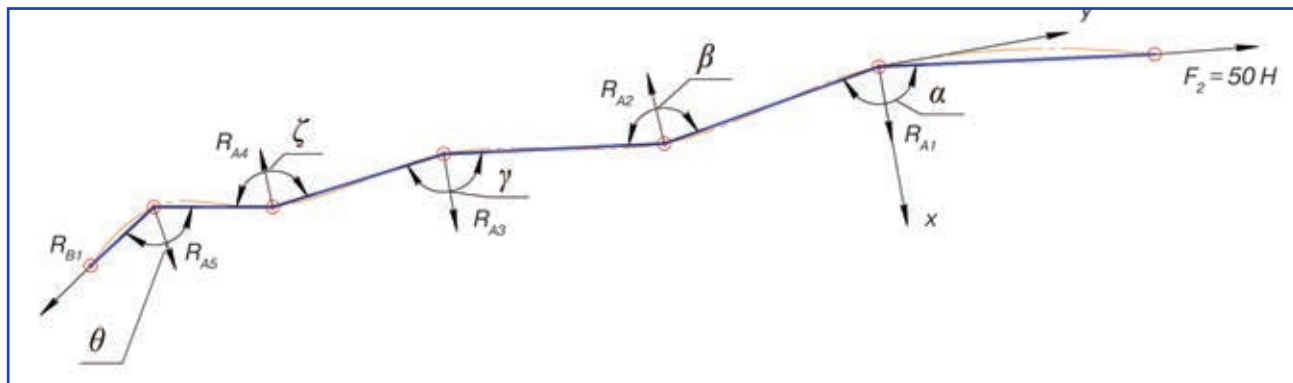


Рисунок 8. Схема міжсегментарних кутів та реакцій залежно від сили ізолюваного натягу сухожилка глибокого згинача пальця в системі координат ХОУ

го згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель № 1).

Згідно з графіком (рис. 7), при згинанні до кута 10° зусилля на всі зв'язки, крім A_3 , знижуються практично до нульових значень. При подальшому збільшенні кута згинання зусилля наростають для зв'язки A_1 і меншою мірою — для A_5 . На зв'язці A_2 зусилля не наростали. Зусилля на зв'язці A_3 зменшувались до кута згинання 45° , а при збільшенні кута згинання знову збільшувались.

Визначали реакції на дії сили від натягу інтактного сухожилка глибокого згинача в точках A_1, A_2, A_3, A_4 і A_5 та B_1 відповідно для варіанта ушкодженого сухожилка поверхневого згинача (рис. 5б). Для цього будували відносно кожної точки власну систему координат ХОУ (рис. 8). Вісь Х відповідає напрямку реакції, що діє у відповідній точці.

Значення реакцій для точок A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 порівнюють:

$$\begin{aligned} R_{A1} &= F_1 \cos(\alpha/2), \\ R_{A2} &= F_1 \cos(\beta/2), \\ R_{A3} &= F_1 \cos(\gamma/2), \\ R_{A4} &= F_1 \cos(\zeta/2), \\ R_{A5} &= F_1 \cos(\theta/2), \\ R_{B1} &= F_1. \end{aligned}$$

Для варіанта дії сил $F_1 = 50 \text{ Н}$ та $F_2 = 0 \text{ Н}$ значення, отримані залежно від кутів згинання в міжфалангових та п'ясно-фаланговому суглобах, наведені в табл. 2.

На рис. 9 подано графік залежності величини напруження в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель № 2)

місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель № 2).

Згідно з графіком (рис. 9), при згинанні до кута 10° зусилля на зв'язки A_1, A_2, A_4 знижуються практично до нульових значень. При подальшому збільшенні 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.

Аналогічним чином визначали реакції дії сили від натягу інтактного сухожилка поверхневого згинача в точках A_1, A_2, A_3 та B_2 відповідно для варіанта ушкодженого сухожилка глибокого згинача (рис. 5в). Для цього будували відносно кожної точ-

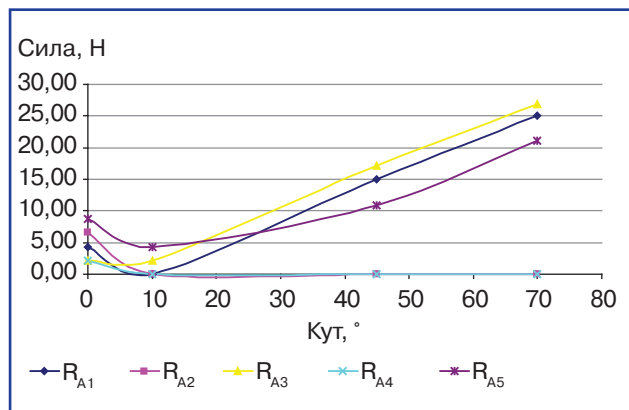


Рисунок 9. Залежність величини напруження в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місцях кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель № 2)

Таблиця 2. Аналіз реакцій у анатомічних зонах анулярних зв'язок та місці кріплення сухожилка глибокого згинача пальця на дію сили скорочення м'язів, Н

Кути згинання, °	R_{B1}	R_{B2}	R_{A1}	R_{A2}	R_{A3}	R_{A4}	R_{A5}
0	50	0	4,36	6,53	2,18	2,18	8,68
10			0,00	0,00	2,18	0,00	4,36
45			15,03	0,00	17,10	0,00	10,82
70			25,00	0,00	26,86	0,00	21,13

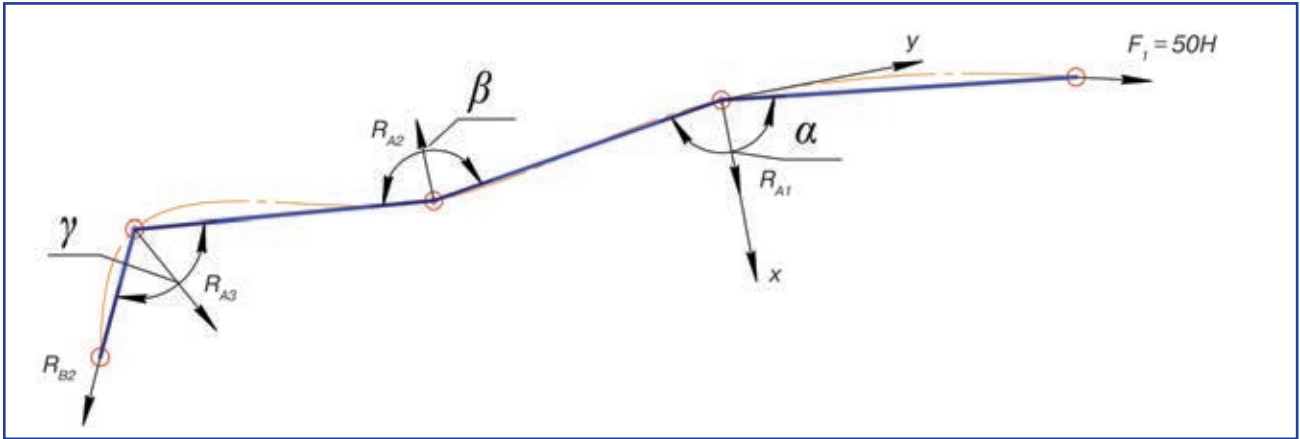


Рисунок 10. Схема міжсегментарних кутів та реакцій залежно від сили ізолюваного натягу сухожилка поверхневого згинача пальця у системі координат X0Y

ки власну систему координат X0Y. Вісь X відповідає напрямку реакції, що діє у відповідній точці. Значення реакцій для точок A₁, A₂, A₃ та B₂ (рис. 10) дорівнюють:

$$\begin{aligned} R_{A1} &= F_2 \cos(\alpha/2), \\ R_{A2} &= F_2 \cos(\beta/2), \\ R_{A3} &= F_2 \cos(\gamma/2), \\ R_{B1} &= F_2. \end{aligned}$$

Для варіанта дії сил F₁ = 0 Н та F₂ = 50 Н значення, отримані залежно від кутів згинання в міжфалангових та п'ясно-фаланговому суглобах, наведені в табл. 3.

На рис. 11 подано графік залежності величини напруження в анатомічних зонах анулярних зв'язок та місця кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель № 3).

Згідно з графіком (рис. 11), при згинанні до кута 10° зусилля на всі зв'язки, крім A₃, знижуються практично до нульових значень. При подальшому збільшенні кута згинання зусилля наростають для зв'язки A₁. На зв'язці A₂ зусилля не наростали. Зусилля на зв'язці A₃ різко зменшувались до кута згинання 45°, а потім продовжували плавно зменшуватися до кута згинання 70°.

Із табл. 1–3 та графіків (рис. 7, 9, 11) видно, що при згинанні фаланг пальця зусилля в точках A₁, A₃ і A₅ зростають. Це пояснюється тим, що кути в міжфалангових суглобах зменшуються, а косинуси цих

кутів, навпаки, зростають. Навантаження на сухожилки відрізняється залежно від кута згинання в міжфалангових та п'ясно-фалангових суглобах. Ці значення навантажень можуть змінюватись у декілька разів.

При пошкодженні одного із сухожилків інший компенсаторно сприймає додаткове навантаження. У цих умовах локальні навантаження в ділянках сухожилкового каналу зростають у 1,5–2 рази, що може привести до перевищення межі міцності анулярної зв'язки, сухожилка або ділянки його кріплення та викликати їх пошкодження. Так, у випрямленому положенні пальця (міжсегментарні

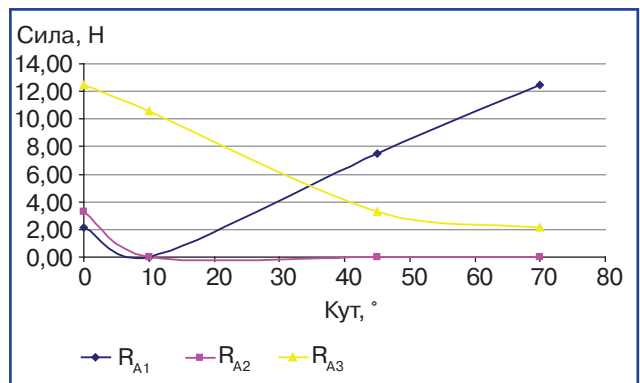


Рисунок 11. Залежність величини напруження у анатомічних зонах анулярних зв'язок та місця кріплення сухожилків поверхневого та глибокого згиначів пальця від кутів згинання в міжфалангових суглобах (модель 3)

Таблиця 3. Аналіз реакцій у анатомічних зонах анулярних зв'язок та місці кріплення сухожилка поверхневого згинача пальця на дію сили скорочення м'язів, Н

Кути згинання, °	R _{B1}	R _{B2}	R _{A1}	R _{A2}	R _{A3}	R _{A4}	R _{A5}
0	50	0	2,18	3,26	12,50	0	0
10			0,00	0,00	10,57		
45			7,52	0,00	3,26		
70			12,50	0,00	2,18		

кути дорівнюють 0°) реакції на дію сили в центрі анулярної зв'язки ділянки п'яско-фалангового суглоба (A_1) та в центрі анулярної зв'язки основної фаланги (A_2) залишаються незмінними при інтактних сухожилках (4,36 Н та 6,53 Н відповідно) та пошкодженні одного з них. При пошкодженні сухожилка поверхневого згинача пальців реакція в центрі анулярної зв'язки проксимального міжфалангового суглоба (A_3) знижується порівняно з інтактними сухожилками (13,59 Н) на 84 % — до значень 2,18 Н. При пошкодженні сухожилка глибокого згинача реакція на дію сили відповідно збільшується на 84 %, що може привести до перенавантаження структур анулярної зв'язки в ділянці A_3 .

Реакція на дію сили в центрі анулярної зв'язки дистальної фаланги (A_4) зростає на 100 % щодо нор-

ми (1,09 Н) при пошкодженні поверхневого згинача та спадає до 0 при пошкодженні глибокого згинача. Така ж ситуація спостерігається й у центрі анулярної зв'язки дистального міжфалангового суглоба (A_5). Там реакція на дію сили також зростає на 100 % при пошкодженні поверхневого згинача та спадає до 0 при пошкодженні глибокого згинача. У зв'язку з цим випадає функція згинання дистальної фаланги пальця.

В умовах згинання пальця у міжфалангових суглобах на 10° (міжсегментарні кути дорівнюють 10°) ситуація значно змінюється. У ділянках перегину сухожильного каналу над міжфаланговими та п'яско-фаланговим суглобами реакції на дію сил будуть максимальними. Так, у ділянці A_1 реакція на дію сили підвищується на 100 % порівняно з випрям-

леним положенням пальця (міжсегментарні кути дорівнюють 0°) та залишається незмінною в умовах як інтактних, так і пошкоджених сухожилків.

У ділянці A_2 значення реакції на дію сили наближується до 0 та зберігається незмінним в умовах як інтактних, так і пошкоджених сухожилків.

У ділянці A_3 реакція на дію сили зменшується на 63 % при пошкодженні сухожилка поверхневого згинача та збільшується на 63 % при пошкодженні сухожилка глибокого згинача.

У ділянці A_4 ситуація аналогічна ділянці A_2 : значення реакції на дію сили наближується до 0 та зберігається незмінним в умовах як інтактних, так і пошкоджених сухожилків.

У ділянці A_5 реакція на дію сили зростає на 100 % при пошкодженні сухожилка поверхневого згинача та відсутня (дорівнює 0) при пошкодженні сухожилка глибокого згинача (відсутня функція згинання).

За допомогою вищеведених обчислень можна вирахувати зусилля в потрібних точках для будь-якого міжсегментарного кута.

У результаті кінцево-елементного моделювання отримано розрахунки на-

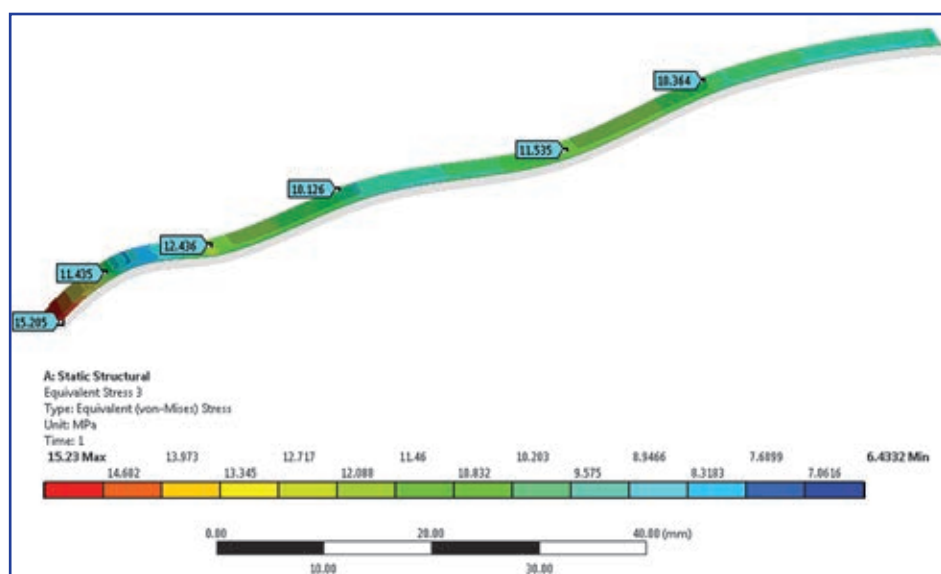


Рисунок 12. Напруження, що виникають уздовж сухожилка глибокого згинача (за Мізесом)

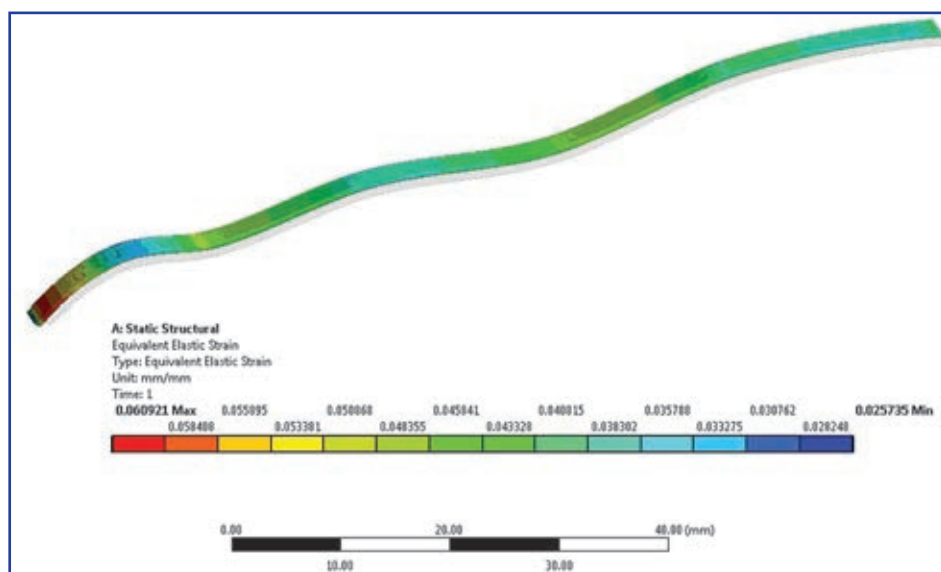


Рисунок 13. Деформації, що виникають уздовж сухожилка глибокого згинача

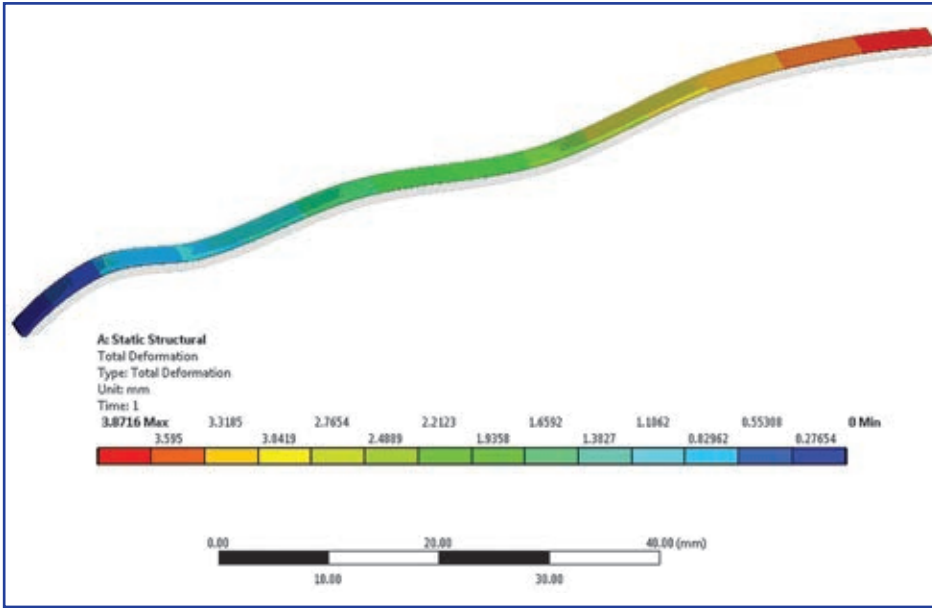


Рисунок 14. Переміщення

пружено-деформованого стану структур згинально-го апарату пальців кисті (рис. 12–14).

За даними розрахунків, при прикладанні зусилля 50 Н на проксимальний кінець сухожилка глибокого згинача максимальні напруження 15,23 МПа спостерігаються в ділянці прикріплення сухожилка до дистальної фаланги пальця. З урахуванням обмеженої площі контакту дистального кінця сухожилка з кісткою такий рівень напружень в умовах прикладання більших зусиль може перевищувати міцність цієї ділянки та призводити до пошкодження з відривом сухожил-

Таблиця 4. Сили (Н) та напруження (МПа) в ділянках згинального апарату пальця кисті

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

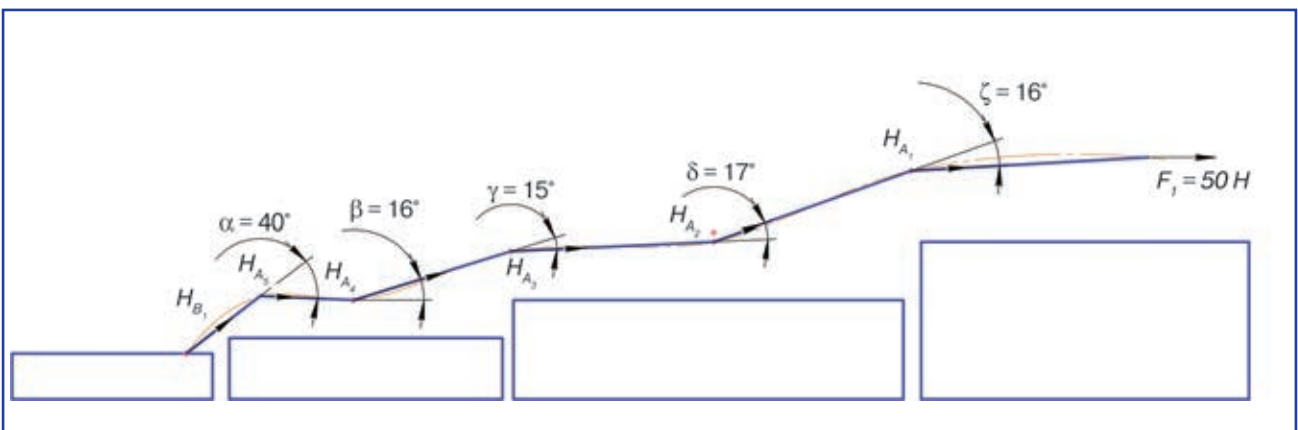


Рисунок 15. Розрахункова схема

ка від місця прикріплення. На протязі сухожилкового каналу піки напружень та деформацій з'являються в ділянках проекції міжфалангових суглобів (рис. 12–13). Переміщення закономірно збільшуються у міру віддалення від ділянки прикріплення сухожилка у проксимальному напрямку (рис. 14).

Вірогідність скінченно-елементних розрахунків напружень перевірено аналітично за допомогою розрахункової схеми (рис. 15):

$$\begin{aligned}
 H_{B1} &= F_1; \\
 H_{A5} &= H_{B1} \cdot \cos \alpha; \\
 H_{A4} &= H_{A5} / \cos \beta; \\
 H_{A3} &= H_{A4} \cdot \cos \gamma; \\
 H_{A2} &= H_{A3} / \cos \delta; \\
 H_{A1} &= H_{A2} \cdot \cos \zeta.
 \end{aligned}$$

Напруження вираховується за формулою:

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

де P — сила, що діє в даній точці; F — площа поперечного перерізу сухожилка.

Площа вираховується за спрощеною формулою:

$$F = a \times b,$$

де a — поздовжній, b — поперечний розміри перерізу сухожилка.

У результаті аналітичного розрахунку отримали показники напруження R_{B1} , що дорівнюють $50/3 = 16,7$ МПа.

Порівнюючи результати розрахунків напруження кінцево-елементним методом — $R_{B1} = 15,21$ МПа (рис. 9) із результатами аналітичних розрахунків (табл. 4) —

$R_{B1} = 16,7$ МПа, відзначаємо, що були отримані майже аналогічні дані, які відрізняються на 8,8 %. Із цього можна зробити висновок, що проведені розрахунки є вірогідними та відповідають дійсності.

Висновки

1. Встановлено, що напруження на анулярних зв'язках A_1 та A_2 при обох функціонуючих сухожилках поверхневого й глибокого згиначів, а також у випадку функціонування лише сухожилка глибокого згинача в амплітуді від 0 до 70° згинання змінюється від 4,36 до 15,03 Н та від 6,53 до 0 Н відповідно, а в моделі з функціонуючим сухожилком поверхневого згинача зменшується в 2 рази.

2. Напруження на анулярну зв'язку A_3 при межсегментарних кутах 0° найбільші у випадку цілісності обох сухожилків (13,60 Н), а при зміні межсегментарних кутів до 70° збільшуються на 41 % при функціонуванні лише сухожилка глибокого згинача.

3. Напруження на анулярну зв'язку A_4 при збереженні цілісності лише сухожилка глибокого згинача збільшується в 2 рази порівняно з моделлю з неушкодженими сухожилками (при кутах згинання 0°), але залишається незмінним при кутах 70°.

4. Напруження на зв'язку A_5 при ушкодженні сухожилка поверхневого згинача в діапазоні кутів згинання від 0 до 70° збільшується в 2 рази порівняно з моделлю з неушкодженими сухожилками.

5. Проведені розрахунки показують закономірності розподілу зусиль на згинальний апарат пальців кисті й свідчать про те, що у випадках ізольованого пошкодження сухожилля поверхневого згинача збільшується напруга в дистальних точках фіксації сухожилка глибокого згинача й зв'язкового апарату пальця, що призводить до перенавантаження зони шва при відновленні сухожилка глибокого згинача та анулярних зв'язок.

6. За допомогою біомеханічного експерименту доведено, що при збільшенні навантаження на палець більше допустимих норм за умови функціонуючого сухожилка глибокого згинача підвищується ризик його ушкодження.

Список літератури

1. Безуглий А.А. Профілактика, діагностика та лікування ускладнень після відновлення сухожилків згиначів пальців кисті в «критичній зоні»: Дис... канд. мед. наук: 14.02.21 / Безуглий Артур Анатолійович. — К., 2010. — 174 с.
2. Голубев И.О. Восстановление подвижности сухожилий сгибателей пальцев кисти при их повреждении в зоне фиброзно-синовиальных влагалищ: Дис... канд. мед. наук: 14.00.22 / Голубев Игорь Олегович. — Иванов, 1997. — 130 с.
3. Гринягин И.В. Компьютерная диагностика двигательной активности пальцев руки человека на основе биомеханического моделирования: Дис... канд. мед. наук: 03.01.09 / Гринягин Иван Владимирович. — М., 2011. — 170 с.

4. Дараган Р.І. Відновлення сухожилків згиначів пальців кисті при пошкодженнях в «критичній зоні» в умовах раннього функціонального навантаження: Дис... канд. мед. наук: 14.00.21 / Дараган Руслан Іванович. — Харків, 2004. — 154 с.
5. Ломаю М.П. Двухэтапная тендопластика при застарелых повреждениях сухожилий сгибателей пальцев кисти с применением активных силиконовых сухожильных эндопротезов // Ортопедия и травматология. — 2007. — № 3(45). — С. 68-72.
6. Мигулева И.Ю. Метод тендопластики при повреждении сухожилий сгибателей пальцев кисти в области фиброзно-синовиальных каналов: Дис... д-ра мед. наук: 14.00.22 / Мигулева Ирина Юрьевна. — М., 1998. — 296 с.
7. Микусев Г.И. Лечение поврежденных сухожилий глубоких сгибателей на протяжении синовиально-апоневротических каналов пальцев кисти: Дис... канд. мед. наук: 14.00.22 / Микусев Глеб Иванович. — Казань, 2003. — 138 с.
8. Науменко Л.Ю. Восстановление сухожилий сгибателей пальцев кисти при повреждениях в «критической зоне» в условиях ранней функциональной нагрузки / Л.Ю. Науменко, Р.И. Дараган // Вторая юбилейная научно-практическая международная конференция: Тезисы докладов. — М.: Изд-во РУДН, 2005. — С. 153-156.
9. Страфун С.С., Безуглий А.А. Профілактика ускладнень, що виникають після реконструктивних втручань на сухожилках згиначів пальців кисті у «критичній зоні» // Ортопедия, травматология и протезирование — 2012. — № 1. — С. 30-35.
10. Товмасын В.Г. Комплексне лікування пошкоджень сухожилів згиначів пальців кисті в критичній зоні: дис. канд. мед. наук: 14.00.21 / Товмасын Віген Володимирович. — К., 2006. — 147 с.
11. Федосеев А.В., Лапин В.В., Лобанов Д.С. Оценка результатов лечения поврежденных сухожилий сгибателей пальцев кисти // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. — 2003. — № 2. — С. 64.
12. Щербаков М.А. Оптимизация способов пластики сухожилий сгибателей 2–5-го пальцев кисти при их повреждениях в зоне костно-фиброзного канала: Дис... канд. мед. наук: 14.00.22 / Щербаков Михаил Александрович. — Саратов, 2009. — С. 84.
13. Darlis N.A., Beris A.E., Korompilias A.V., Vekris M.D., Mitsionis G.I., Soucacos P.N. Two-stage flexor tendon reconstruction in zone 2 of the hand in children // J. Pediatr. Orthop. — 2005. — Vol. 25, Iss. 3. — P. 382-386.
14. Mohammed Heshmat Abdul-Kader, Mahmoud A.M.A. Two-stage reconstruction for flexor tendon injuries in zone II using a silicone rod and pedicled sublimis tendon graft // Indian J. Plast. Surg. — 2010. — Vol. 43, Iss. 1. — P. 14-20.
15. Siguo S., Yong Ding, Baoan Ma, Yong Zhou. Two-stage flexor tendon reconstruction in zone 2, using Hunter's technique // Orthopedics. — 2010. — Vol. 33, Iss. 12. — P. 880.

Получено 10.12.13 □

Лазарев І.А., Куринній І.Н., Ярова М.Л., Скибан М.В.
ДУ «Інститут травматології і ортопедії НАМН України»,
г. Київ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ СГИБАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПАЛЬЦЕВ КИСТИ ПРИ СТАНДАРТНОЙ НАГРУЗКЕ

Резюме. Использование метода двухэтапной пластики с сохранением сухожилия поверхностного сгибателя позволяет снизить нагрузку на связочный аппарат сухожилия глубокого сгибателя, избежать возникновения сгибательной контрактуры и функциональной недостаточности сгибания пальца.

При проведении биомеханического эксперимента — моделирования напряженно-деформированного состояния элементов сгибательного аппарата пальцев кисти — сухожилий поверхностного сгибателя, сухожилий глубокого сгибателя, связок пальцев кисти, фаланг пальцев кисти — исследовались 3 модели: с функционирующими сухожилиями поверхностного и глубокого сгибателей, с функционирующим сухожилием глубокого сгибателя, с функционирующим сухожилием поверхностного сгибателя.

Установлено, что напряжение в дистальных точках крепления сухожилия глубокого сгибателя и аннулярных связок проксимальных и дистальных межфаланговых суставов увеличивается при отсутствии сухожилия поверхностного сгибателя с максимальными значениями при межсегментарных углах сгибания 70°.

На основании проведенных расчетов показаны закономерности распределения усилий на сгибательный аппарат пальцев кисти и сделан вывод о том, что в случаях изолированного повреждения сухожилия глубокого сгибателя целесообразно сохранять сухожилие поверхностного сгибателя с целью предотвращения перенапряжения в дистальной точке фиксации сухожилия глубокого сгибателя и связочного аппарата пальца.

Ключевые слова: сухожилие поверхностного сгибателя, сухожилие глубокого сгибателя, критическая зона, аннулярные связки, изолированное повреждение, напряжения и деформации.

Lazarev I.A., Kurinny I.M., Yarova M.L., Skyban M.V.
State Institution «Institute of Traumatology and Orthopedics of
National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

DISTRIBUTION OF EFFORTS IN DIFFERENT PARTS OF THE FLEXOR APPARATUS OF FINGERS UNDER STANDARD LOAD

Summary. The use of two-stage sublimit tendon-sparing plastic repair enables to reduce the load on the ligaments of profundus tendons, to avoid flexion contracture and the failure of flexion of the finger.

When conducting biomechanical experiment — modeling of the stress — strained state of the flexor apparatus fingers — superficial flexor tendon, the deep flexor tendons, ligaments of the fingers, the phalanges of fingers — 3 models were investigated: with functioning tendons superficial and deep flexor tendons with a functioning deep flexor with the superficial flexor tendon functioning.

It is found that the tension in the distal tendon attachment points and the deep flexor of annular ligament proximal and distal interphalangeal joints is increased in the absence of superficial flexor tendon with the highest values at intersegmental flexion angles of 70°.

On the basis of the calculations there are shown patterns of distribution efforts on the flexor apparatus fingers and concluded that in cases of isolated damage to the deep flexor tendon is advisable to keep superficial flexor tendon to prevent surge in the distal fixation point the deep flexor tendons and ligaments of the finger.

Key words: superficial flexor tendon, deep flexor tendon, the critical area, annular ligaments, isolated injury, stress and strain.