

УДК 617.3

НАУМЕНКО Л.Ю.¹, БОНДАРУК Д.О.², ПАВЛЕНКО І.Д.³¹ДЗ «Дніпропетровська медична академія»²ДУ «Український державний НДІ медико-соціальних проблем інвалідності МОЗ України»³Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

БІОМЕХАНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАЛЬЦІВ КИСТЕЙ В УМОВАХ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗАСТАРІЛИХ УШКОДЖЕННЯХ СУХОЖИЛКІВ РОЗГИНАЧІВ

Резюме. У статті наведені результати проведених експериментальних досліджень функціонування проміжних кісток кисті при наявності типових деформацій, що виникають у випадках застарілих ушкоджень сухожилків розгиначів. Установлено функціональний дисбаланс згинально-розгинальних зусиль за наявності деформацій за типом бутоньєрки й «шиї лебедя». Об'єктивізовано зсув пікових навантажень в епіметафізарних зонах суміжних сегментів в умовах деформації.

Ключові слова: деформація пальців, сухожилки розгиначів.

Вступ

Розгинання пальців і кисті — це складний процес взаємодії декількох груп м'язів та їх сухожилків, порушення якого потребує диференційованого підходу при наданні хірургічної допомоги пацієнтам [1, 2]. Порушення складної біомеханіки функціонування розгинального апарату пальців при різних травмах, діагностичні помилки, особливо при підшкірних пошкодженнях сухожилків розгиначів, і, як наслідок цього, несвоєчасне та недостатнє за обсягом ортопедичне лікування даної категорії постраждалих часто призводять до стійких деформацій пальців. Кількість незадовільних результатів лікування у цих хворих досягає 50 % [3].

Подальше вдосконалення заходів медичної реабілітації цього контингенту постраждалих, що включають у себе передопераційну підготовку, хірургічну корекцію та функціональне лікування в післяопераційному періоді, неможливе без розуміння біомеханічних передумов формування теногенних деформацій та особливостей функціонування пальців при тих чи інших ушкодженнях розгинального апарату.

Матеріали й методи дослідження

З метою встановлення біомеханічних характеристик функціонування пальців кисті в умовах типових теногенних деформацій нами було проведено серію експериментальних досліджень, що включали фізичний (натурний) експеримент та обчислювальні дослідження.

З точки зору механіки кисть можна представити як систему стрижневих елементів (кісток), з'єднаних між

собою шарнірами (суглобами), рух яким надають тяги (м'язи та сухожилки). Для проведення практичної частини експериментального дослідження було виготовлено модель трьохфалангового пальця, яка за своїми механічними характеристиками в досліджуваному діапазоні поведінки була подібна до біологічного об'єкта, що вивчався.

Мдель мала контактні поверхні, геометрично подібні до суглобових поверхонь п'ястково-фалангового (ПФС) та міжфалангових суглобів. При цьому допускалася невідповідність геометрії на міжсуглобових ділянках. За допомогою бокових еластичних кріплень було виконано з'єднання елементів моделі, що слугувало бокової стабільності та забезпечувало моноплосинні рухи у з'єднаннях, обсяг яких відповідав фізіологічній амплітуді функціонування суглобів пальця.

Динамічні властивості були забезпечені поліамідними тягами, що фіксували до елементів конструкції аналогічно кріпленню сухожилкових пучків згиначів та розгиначів пальців. Центрацію тяг по осі пальця здійснювали за допомогою дугоподібних фіксаторів по аналогії з кільцеподібними зв'язками. Мдель кріпили на спеціальній фермі, форму якої обирали виходячи з міркувань зручності проведення експерименту.

Геометричні параметри системи визначали прямим вимірюванням рентгенограм. Вивчення навантажень на суглоби пальця проводили з використанням рент-

© Науменко Л.Ю., Бондарук Д.О., Павленко І.Д., 2014

© «Травма», 2014

© Заславський О.Ю., 2014

генограми променя під навантаженням, прикладеним до дистальної фаланги в фізіологічній позиції та при наявності деформації за типом бутоньєрки. Величина зусилля становила 10 Н.

Результати та їх обговорення

З метою об'єктивної оцінки навантажень на суглобові поверхні променевої кістки кисті в нормі та в умовах типових теногенних деформацій пальців було проведено обчислювальні дослідження. Безпосередньо зовнішнє навантаження та його проекції на площині чи осі не дорівнюють рівнодіючим контактних реакцій на метаепіфізарні зони кісток у ділянці суглоба у зв'язку з тим, що зовнішній вплив сприймає механічна система, що складається як із шарнірного з'єднання жорстких елементів (фаланг пальців), так і з гнучких зв'язок (сухожилків), що сприймають розтягуюче напруження. Обмежуючись лише задачею визначення порядку величини контактних зусиль, задачу визначення рівнодіючих навантажень на епіметафізарні зони було досліджено на прикладі проксимального міжфалангового суглоба в умовах деформації за типом бутоньєрки, що є найбільш типовою для ушкоджень розгинального апарату пальців. Застосована схема навантаження показана на рис. 1.

Напрямок прикладеного зусилля показано на рис. 1 суцільною стрілкою, рівнодіючі контактних зусиль на суглобові поверхні показані на рисунку пунктирними стрілками.

Визначення вказаних характеристик проводили за допомогою рівняння рівноваги плоского напруженого стану. Підсистеми кісток пальця виділяли з повної системи за допомогою зрізів, що проводили через центр обертання проксимального міжфалангового суглоба:

$$\sum X_i = 0, \sum Y_i = 0, \sum M_i = 0,$$

де X_i — проекції на вісь X що збігається з віссю фаланги, компонентів внутрішніх зусиль і зовнішнього навантаження Y_i — проекції на вісь Y компонентів внутрішніх та зовнішніх зусиль. По визначених в результаті рішення системи рівнянь компонентах внутрішніх зусиль визначали величину рівнодіючої контактної зусилля та її нахил до осі фаланг.

Місцеві системи координат обирали так, що вісь абсцис X направлялась уздовж фаланги, що розглядалась. Вісь ординат Y перпендикулярна до осі X . Рівняння моментів складали відносно осі обертання суміжних фаланг, положення якої ототожнювали з центром

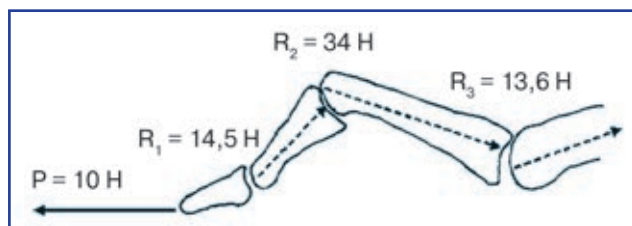


Рисунок 1. Схема навантаження пальця при деформації за типом бутоньєрки

кривизни суглобової поверхні. Геометричні розміри, що використовували в розрахунках, були отримані прямим вимірюванням рентгенограм. Оскільки у рівняннях рівноваги для визначення зусиль геометричні характеристики входять у вигляді відношень, то масштаб рентгенограм (проекційне збільшення) не має значення, тобто вибір збільшення визначався з огляду на міркування зручності обробки матеріалу.

Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Отримані в результаті розв'язання системи рівнянь вектора контактних зусиль дані застосували для визначення вектора напруг і внутрішніх зусиль. По вказаних векторах збудовані інтерполяційні поліноми, що дозволили визначити необхідний розподіл напружень та перемішень у ділянці ПМФ суглоба у вигляді ізоліній та різнозабарвлених зон. У програмному комплексі з методу кінцевих елементів були вибрані ізопараметричні трьохмірні тетраедри, що дозволило з високим ступенем точності змодельовати всі особливості побудови розрахункового масиву (суглоба). Використовуючи сучасні прийоми програмування, результуючий розподіл можна представити в зручному для аналізу напружень графічному вигляді (рис. 2).

Розподіл напружень наведено на рис. 2 у вигляді різнозабарвлених зон, для визначення рівня напруження у вибраній зоні показана кольорова оцифрована лінійка. Шість зон забарвлення покривають весь інтервал зміни досліджуваного параметра. Між і забарвлених ділянок розділені ізолініями. Перша ізолінія відмежовує зону з найменшим значенням напружен-

Таблиця 1. Параметри векторів рівнодіючих контактних зусиль суглобів пальця при деформації за типом бутоньєрки

Суглоб	Величина рівнодіючих зусиль, Н	Нахил рівнодіючих до осі фаланги, α°	Зусилля у згиначі, Н
ПФС	13,6	8	—
ПМФС	34	20	21,6
ДМФС	14,5	23	20

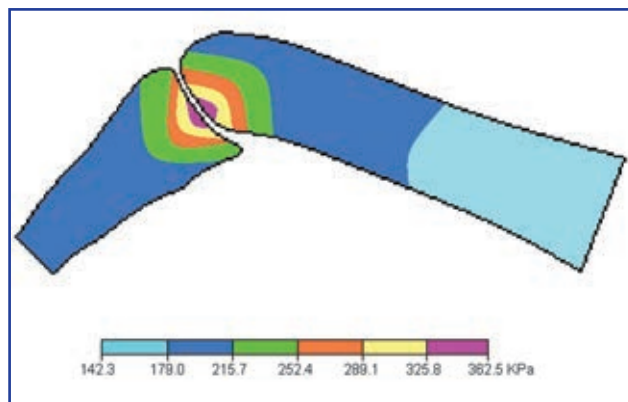


Рисунок 2. Розподіл напружень у ділянці проксимального міжфалангового суглоба при деформації за типом бутоньєрки

ня, остання (п'ята) виділяє зону найбільших значень. Розподіл напруженого стану в кістках швидко згасає по мірі віддалення від зони контакту. На відстані 1,5 діаметра голівки фаланг напружений стан стає практично однорідним.

Як видно з рис. 2, величина максимальних напружень в епіфізарних зонах суглоба в умовах деформації не перевищує 362,5 кПа, не є критичною і не призводить до руйнування кісткових структур. Разом із цим в умовах деформації контактна пляма та відповідно зона максимального напруження зміщується на периферичні відділи епіфізарних зон. Як відомо, товщина суглобового хряща в цих відділах менша, ніж у центральній частині суглобової поверхні. Таким чином, наявна деформація є передумовою розвитку атрофії від тиску в метаепіфізарних відділах фаланг пальця. Це, у свою чергу, слугує причиною розвитку вторинних дегенеративно-дистрофічних змін у залучених до деформації суглобах та формування артрогенного компоненту деформації.

На наступному етапі дослідження шляхом проведення натурного експерименту були встановлені співвідношення згинальних та розгинальних зусиль, що виникають при функціонуванні пальця у фізіологічних умовах та при типових теногенних деформаціях. Прикладаючи певне зусилля на одну з тяг, імітатор сухожилка, та урівноважуючи його навантаженням тяги антагоніста, встановили залежність необхідних зусиль при нормальній геометрії променя пальця та найбільш типових деформаціях. Так, відновлення рівноваги стрижня (променя пальця) у фізіологічних умовах досягалось при співвідношенні згинальних та розгинальних зусиль як 1 : 2. У випадку, коли вихідна позиція моделі відповідає деформації за типом бутоньєрки, це співвідношення становило 1 : 2,75, тобто втрата ефективності роботи розгиначів становила 38 % (рис. 3).

Аналогічним чином була встановлена залежність згинально-розгинальних зусиль при вихідній деформації пальця за типом «шиї лебедя». У випадку вказаної деформації пальця це співвідношення змінюється в напрямі зменшення ефективності згиначів та становить 1 : 0,7. З огляду на наведену залежність у випадку деформації пальця за типом «шиї лебедя» втрата ефективності згиначів становить 65 % (рис. 4).

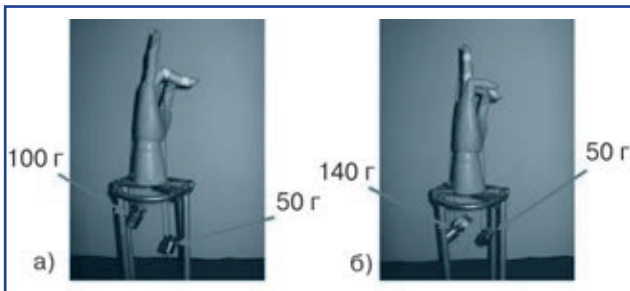


Рисунок 3. Розгинання пальця при деформації за типом бутоньєрки: а) недостатність фізіологічного розгинального зусилля; б) розгинання при збільшенні зусилля

З метою визначення ступеня латерального зміщення бокових порцій сухожилка розгинача, необхідного для повного згинання пальця, проведено наступний етап експериментального дослідження.

У положенні повного розгинання моделі пальця імітатори пучків розгинача знаходились по розгинальній поверхні близько центральної осі. У процесі згинання бокові тяги на рівні з'єднання, що відповідали проксимальному міжфаланговому суглобу, зміщувались у латеральному напрямі, віддаляючись від центральної осі пальця. Після досягнення повного згинання в шарнірних з'єднаннях проведено замір відстані між боковими тягами. Ця відстань становила 12 мм (рис. 5).

Отже, проведеними дослідженнями були встановлені особливості функціонування пальців кистей в умовах типових теногенних деформацій при пошкодженнях сухожилків розгиначів, що полягають у формуванні функціонального дисбалансу згинально-розгинальних зусиль, а також у створенні передумов для виникнення вторинних дегенеративно-дистрофічних змін суглобових структур.

Висновки

1. Шляхом проведення експериментальних досліджень із застосуванням фізичних експериментів, обчислювальних досліджень вивчені передумови формування деформацій пальців при різних варіантах ушкодження сухожилків розгиначів та простежені біомеханічні особливості функції пальців в умовах деформації.

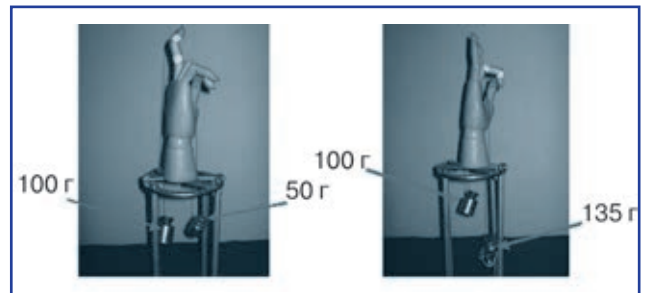


Рисунок 4. Згинання пальця при деформації за типом «шиї лебедя»: а) недостатність фізіологічного згинального зусилля; б) згинання при збільшенні зусилля

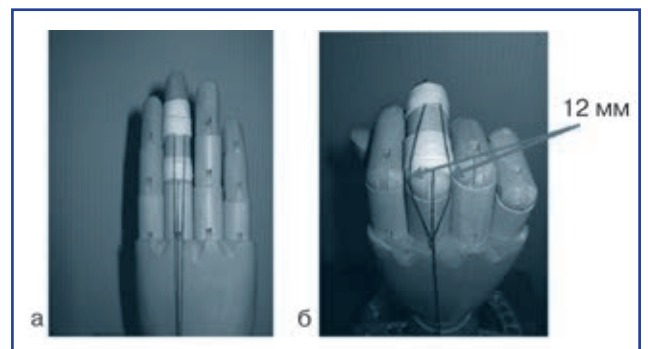


Рисунок 5. Динамічна латеропозиція бокових порцій розгинача: а) положення бокових пучків при розгинанні пальця; б) зміщення бокових порцій при згинанні пальця

2. Отримані експериментальним шляхом дані є підґрунтям для вдосконалення методів оперативної корекції деформацій пальців кисті при ушкодженнях сухожилків розгиначів та оптимізації реабілітаційних заходів у післяопераційному періоді.

Список літератури

1. Золотов А.С. Особенности и результаты лечения различных вариантов дистальных поврежденных пальцев кисти, приводящих к молоткообразной деформации / А.С. Золотов, В.Н. Зеленін // Вестник травматоло-

логии и ортопедии имени Н.Н. Приорова. — 2006. — № 2. — С. 81.

2. Корнилов Н.В. Травматология и ортопедия, руководство для врачей / Н.В. Корнилов. — СПб.: Гиппократ, 2005. — Т. 2. — 892 с.
3. Страфун С.С. Лікування травматичних ушкоджень сухожилків розгиначів пальців кисті / С.С. Страфун, С.О. Хименко // Актуальні питання хірургії верхньої кінцівки: Тези доповідей науково-практ. конф. — К., 2010. — С. 233.

Отримано 07.02.14 □

Науменко Л.Ю.¹, Бондарук Д.А.², Павленко І.Д.³

¹ГУ «Днепропетровская медицинская академия»

²ГУ «Украинский государственный НИИ медико-социальных проблем инвалидности МЗ Украины»

³Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

Naumenko L.Yu.¹, Bondaruk D.A.², Pavlenko I.D.³

¹State Institution «Dnipropetrovsk Medical Academy»

²State Institution «Ukrainian State Research Institute of Medical and Social Problems of Disability of Ministry of Healthcare of Ukraine», Dnipropetrovsk

³Dnipropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipropetrovsk, Ukraine

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПАЛЬЦЕВ КИСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗАСТАРЕЛЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ СУХОЖИЛИЙ РАЗГИБАТЕЛЕЙ

Резюме. В статье представлены результаты проведенных экспериментальных исследований функционирования лучевых костей кисти при наличии типичных деформаций, которые возникают в случаях застарелых повреждений сухожилий разгибателей. Установлен функциональный дисбаланс сгибательно-разгибательных усилий при наличии деформаций по типу «бутоны» и «шеи лебедя». Объективизировано смещение пиковых нагрузок в эпиметафизарных зонах смежных сегментов в условиях деформации.

Ключевые слова: деформация пальцев, сухожилия разгибателей.

BIOMECHANICS FEATURES OF FINGERS FUNCTIONING UNDER DEFORMATION IN CHRONIC EXTENSOR TENDON INJURIES

Summary. The article presents the results of experimental studies of the radial bones functioning in typical deformities that occur in cases of chronic extensor tendons injuries. We determined functional imbalance of flexion-extension efforts in the presence of buttonhole and «swan neck» deformities. We objectified deposition of maximum loads in epimetaphyseal zones of adjacent segments in deformity.

Key words: fingers deformity, extensor tendons.