

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СГИБАТЕЛЕЙ НА ПОДВИЖНОСТЬ ПАЛЬЦА: КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ

А.О. Макатерчик

Белорусский государственный университет, Минск;

alina.makaterchik@gmail.com;

науч. рук. – С. М. Босяков, канд. физ.-мат. наук, доц.

Травмы кистей рук сопровождаются повреждением или разрывом связок. Это приводит к ограничению подвижности пальца из-за нарушения координированной работы сухожилий, благодаря которым осуществляется сгибание и разгибание пальца. При проведении операций по восстановлению подвижности пальца, как правило, возникает необходимость выбора определенных сухожилий и связок для сшивания. В настоящее время объективные рекомендации по выполнению таких операций практически отсутствуют, поскольку отсутствуют количественные сведения о перемещениях фаланг пальцев кисти при повреждении одного из сгибателей. Целью данной работы является определение углов поворота фаланг неповрежденного среднего пальца левой руки с двумя сухожилиями при функциональной нагрузке. Под функциональной нагрузкой принималась минимальная сила, соответствующая патологическим изменениям в структуре пальца.

Ключевые слова: поверхностный сгибатель; глубокий сгибатель; конечно-элементный расчет; подвижность пальца, угол поворота.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА КОСТНОЙ ТКАНИ, СВЯЗОК И СУХОЖИЛИЙ

Твердотельная модель четырех фаланг среднего пальца левой руки получена на основании компьютерной томографии с использованием пакета для обработки медицинских изображений MimicsMaterialize. Моделирование связок и сухожилий осуществлялось в пакете SolidWorks с учетом анатомических особенностей их строения и расположения. Полученная модель среднего пальца с обозначениями фаланг, сухожилий и связок представлена на рис. 1.

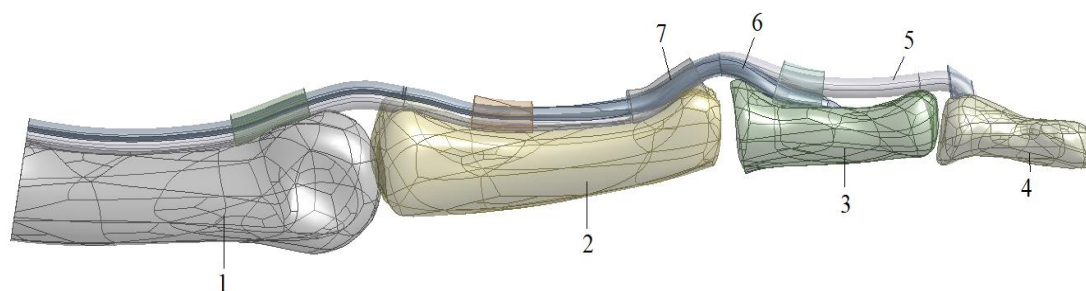


Рис. 1. Модель среднего пальца со связками и сухожилиями:

1 – пястная кость, 2 – проксимальная фаланга, 3 – средняя фаланга,
4 – дистальная фаланга, 5 – глубокий сгибатель, 6 – поверхностный сгибатель,
7 – связка

Физико-механические свойства элементов модели приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Свойства материалов

Материал	Модуль упругости (МПа)	Коэффициент Пуассона
Костная ткань	13700	0,35
Сухожилия	1200	0,45
Связка	50	0,49

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Конечно-элементная сетка сгенерирована в полуавтоматическом режиме. Размер элемента для кости составлял 4 мм, размер элемента для сухожилий и связок – 0,5 мм. Тип конечного элемента – solid185. Конечно-элементное разбиение представлено на рис. 2.

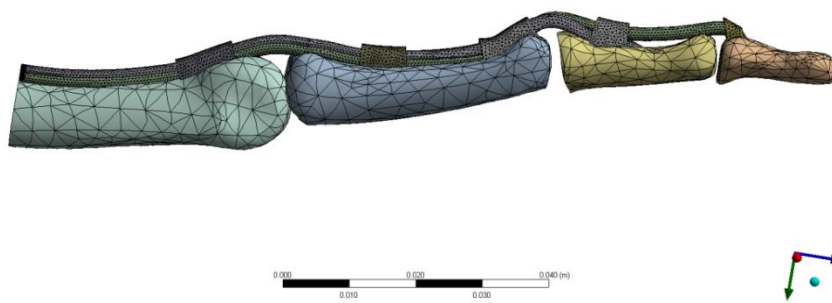


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение

Узлы поперечного сечения пястной кости жестко закреплены. Для определения углов поворота фаланг к каждому сухожилию приложена сила. Коэффициент трения между связками и сухожилиями равен нулю. Связь между фалангами задана в виде сферического шарнира. Граничные условия, накладываемые на средний палец левой руки, представлены на рис. 3 (конечно-элементное моделирование выполнялось в пакете ANSYS Workbench 19.1).

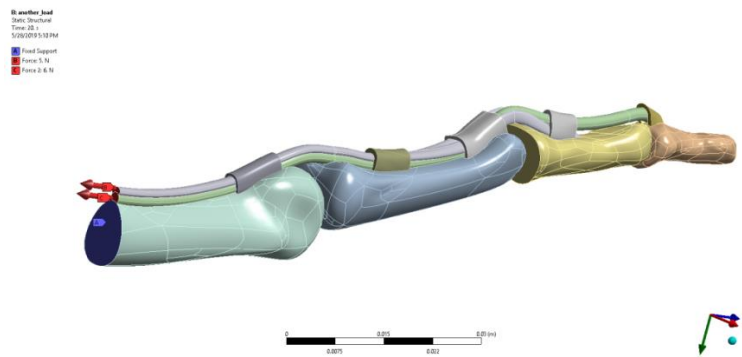


Рис. 3. А – жесткая заделка, В – нагрузка поверхностного сгибателя, С – нагрузка глубокого сгибателя

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минимальная сила для глубокого сгибателя принималась равной 8 Н, при этом минимальная сила поверхностного сгибателя – 4 Н. Наибольшее значение нагрузки для глубокого сгибателя составляло 24 Н, для поверхностного сгибателя – 14 Н[1]. На рис. 4 показан результат конечно-элементного расчета при функциональной нагрузке.

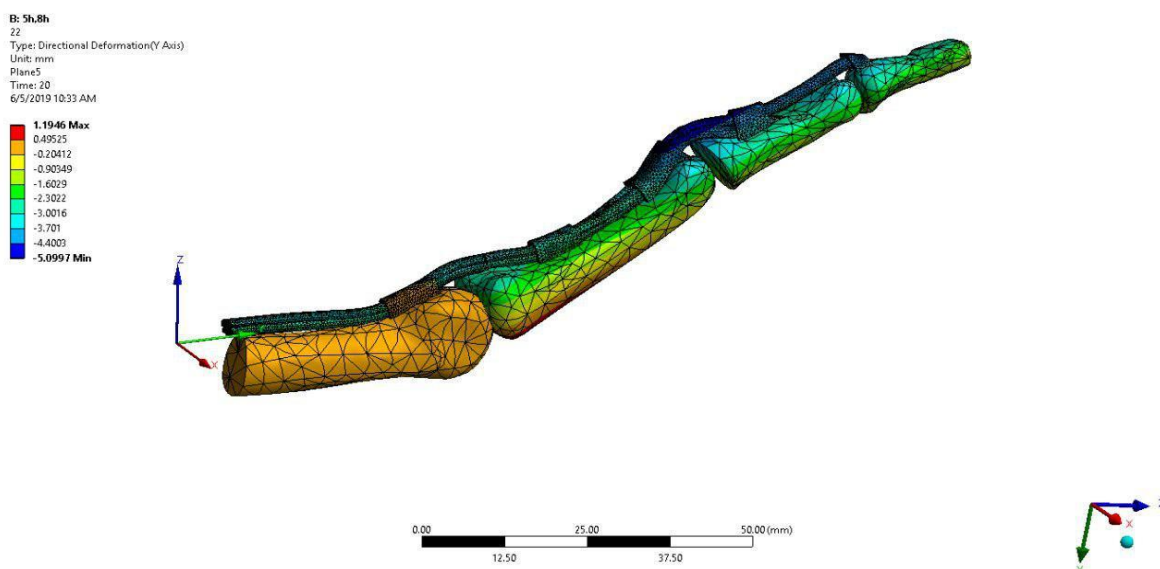


Рис. 4. Подвижность пальца при функциональной нагрузке

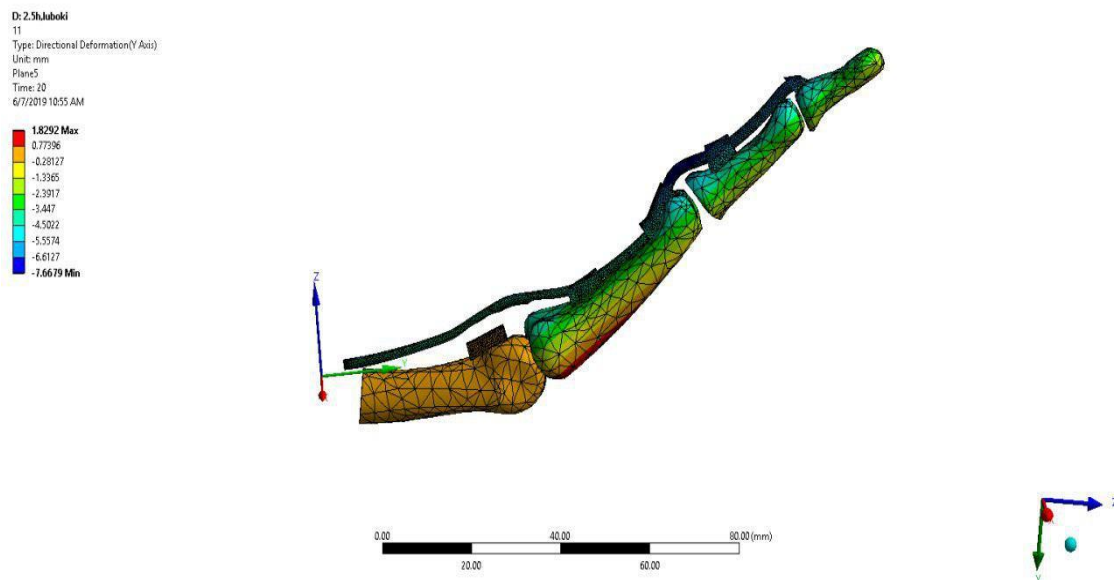


Рис. 5. Подвижность пальца при наличии глубокого сгибателя

Значения углов поворота суставов относительно друг друга (α – угол поворота дистальной фаланги относительно средней, β – угол поворота средней фаланги относительно проксимальной фаланги, γ – угол поворота проксимальной фаланги относительно пястной кости) представлены в таблице 2 [2].

Таблица 2

Углы поворота суставов

Суставы	Максимальные значения углов поворота	Угол поворота при минимальной нагрузке	Угол поворота при наличии глубокого сгибателя
Дистальный (угол α)	80-90°	1°	3°
Проксимальный (угол β)	90-100°	0,3°	3,2°
Пястно-фаланговый (угол γ)	85°	22°	32°

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ таблицы показал, что отсечение одного из сгибателей существенно влияет на повороты фаланг относительно друг друга. При отсечении глубокого сгибателя углы поворота дистальной и средней фаланг уменьшаются, это можно объяснить тем, что глубокий сгибатель служит для сгибания дистального межфалангового сустава, но за сгибанием в этом суставе следует сгибание в проксимальном межфаланговом суставе. При отсечении поверхностного сгибателя практически не поворачивается дистальная фаланга относительно средней и проксимальная фаланга относительно пястной кости, это следует из то-

го, что поверхностный сгибатель сгибает проксимальный межфаланговый сустав и не влияет на дистальный межфаланговый сустав, а также является слабым сгибателем пястно-фалангового сустава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе конечно-элементного расчета были определены углы поворота суставов поврежденного среднего пальца левой руки при функциональной нагрузке, а также углы поворота фаланг неповрежденного пальца при наличии всех сгибателей. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для восстановления нормальной подвижности пальца необходимо наличие и поверхностного, и глубокого сгибателя, поскольку ни одна из связок не обеспечивает достаточные углы поворота фаланг. В случае выбора для сшивания одного из сгибателя получаются потери в углах поворота.

Библиографические ссылки

1. In Vivo Flexor Tendon Forces Increase with Finger and Wrist Flexion during Active Finger Flexion and Extension / K. Kursa // Journal of orthopedic research. 2006. № 24 (4). P. 763–769.
2. Капанджи А. И. Верхняя конечность. Физиология суставов. М., 2014.
3. Toshiyuki Kurihara Mechanical properties of tendons in relation to various sport activities of collegiate athletes. Melbourne, 2012.