

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ФИКСАЦИИ ПЛЮСНЕВОЙ КОСТИ ПОСЛЕ КОРРИГИРУЮЩЕЙ ШЕВРОННОЙ ОСТЕОТОМИИ ПРИ HALLUX VALGUS

Вальгусная деформация большого пальца стопы – одно из наиболее распространенных заболеваний, которое еще недостаточно хорошо изучено. Возникающие осложнения и рецидивы при лечении *hallux valgus* свидетельствуют о необходимости более глубокого изучения состояния костных тканей плюсневой кости как механической системы после оперативного вмешательства. Для решения задачи на основе данных коронарной компьютерной томографии построена геометрическая модель первой плюсневой кости стопы. Разработан ряд конечно-элементных моделей, позволяющих оценить качество фиксации фрагментов первой плюсневой кости после шевронной корригирующей остеотомии. Полученные результаты показали возможность проведения такой оценки на основе анализа максимальных перемещений головки первой плюсневой кости. Результаты подтверждаются медицинским наблюдением за постоперационным состоянием пациентов.

Вальгусна деформація великого пальця стопи – одне із найбільш поширених захворювань, яке ще недостатньо добре досліджено. Виникаючі ускладнення та рецидиви при лікуванні *hallux valgus* свідчать про необхідність більш глибокого дослідження стану кісткових тканин плеснової кістки як механічної системи після оперативного втручання. Для вирішення задачі на основі даних коронарної комп'ютерної томографії побудовано геометричну модель першої плеснової кістки стопи. Розроблено ряд скінченно-елементних моделей, що дозволяють оцінити якість фіксації фрагментів першої плеснової кістки після шевронної корегувальної остеотомії. Отримані результати показали можливість проведення такої оцінки на основі аналізу максимальних переміщень головки першої плеснової кістки. Результати підтверджуються медичним спостереженням за післяопераційним станом пацієнтів.

Hallux valgus is one of the most widespread diseases, which is still not clearly understood. Complications and recurrences occurring in the surgical treatment of *hallux valgus* call for a deeper insight into the postoperative state of tissues of the instep bone as a mechanical system. To resolve a problem, a geometric model of the first metatarsal has been built using the computer coronarography data. A number of finite-elements models have been built for the qualitative assessment of fixation of fragments of the first metatarsal after the chevron corrective osteotomy. The results obtained demonstrated the possibility of assessing based on the analysis of the maximal displacements of the head of the first metatarsal. They are validated by a medical post-surgical control of patients.

Ключевые слова: *плюсневая кость, Hallux Valgus, шевронная остеотомия, костная ткань, напряженно-деформированное состояние.*

Стопа является сложным биомеханическим комплексом, обеспечивающим человеку опору и равновесие при стоянии, реализацию ходьбы, бега и прыжков, защиту опорно-двигательной системы от возможных травм и перегрузок. Деформации стопы нарушают осанку и походку человека, приводят к болям в позвоночнике [1]. Вальгусное отклонение первого пальца стопы занимает второе место среди заболеваний стопы после плоскостопия. Лечение *Hallux Valgus* (лат. *valgus* – искривленный, *hallux* – большой палец стопы) осуществляется при помощи хирургического вмешательства. Цель хирургического лечения – восстановление нормальной биомеханики стопы в статике и движении. При этом важную роль играет правильный выбор схемы операции, тип и место размещения элементов, стабилизирующих положение фрагментов первой плюсневой кости после операции и способствующих быстрому восстановлению биомеханической оси стопы. Выбор подходов к оценке стабилизации плюсневой кости первого пальца стопы после операции является важной и актуальной задачей, так как она позволяет спрогнозировать процесс регенерации костных тканей.

В исследованиях применен метод конечных элементов. Геометрическая модель (рис. 1) рассматриваемой первой плюсневой кости стопы построена

© Д.В. Горобец, А.Н. Науменко, 2016

на основе снимков коронарной компьютерной томографии. С их использованием разработан ряд конечно-элементных моделей. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния первой плюсневой кости как до оперативного вмешательства, так и после шевронной остеотомии при сдвиге головки кости соответственно на 3 мм и 6 мм с фиксациями винтами.



Рис. 1

Расчетная схема, используемая в данных моделях, предполагает упругую заделку основания кости, имитирующую взаимодействие хрящевых тканей сустава, и приложение расчетной нагрузки к головке кости.

При проведении шевронной остеотомии выполняются следующие действия (рис. 2, 3):

- разрез плюсневой кости V-образным контуром;
- сдвиг головки плюсневой кости на необходимое смещение;
- установка винта для соединения и фиксации разделенных фрагментов плюсневой кости.
- отсечение острой выступающей части субхондральной ткани;

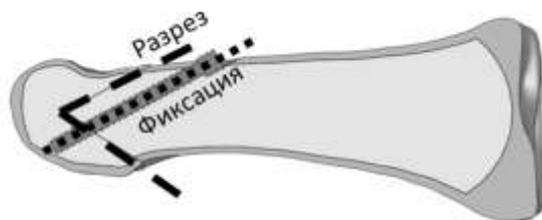


Рис. 2

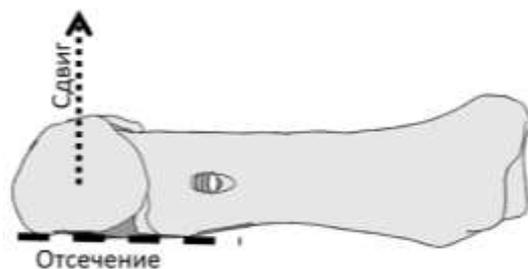


Рис. 3

Исследуем послеоперационное состояние первой плюсневой кости стопы с точки зрения изменений ее поля напряжений и жесткостных характеристик.

Для оценки изменения жесткостных характеристик плюсневой кости после операции рассмотрим максимальные суммарные перемещения в кости в дооперационном состоянии и после шевронной остеотомии с коррекцией расположения головки на 3 мм при действии нагрузок F в трех основных направлениях: продольном, вертикальном и поперечном относительно основных осей плюсневой кости. Для продольного и вертикального направления нагрузка составила 10 Н, для поперечного – 1 Н.

Для указанных нагрузок в табл. 1 приведены суммарные перемещения головки плюсневой кости до и после операции. Как видно из приведенных результатов, из-за потери целостности кости максимальные суммарные перемещения d после операции значительно возрастают.

Таблица 1

| Направление действия силы | Суммарные перемещения d , мм | |
|---------------------------|--------------------------------|----------------|
| | До операции | После операции |
| Вертикальное | 0,00688 | 0,03994 |
| Продольное | 0,04639 | 0,22293 |
| Поперечное | 0,00306 | 0,02895 |

Деформация кости до операции происходит практически равномерно по всей ее длине, составляющей 60 мм. После операции основной вклад в максимальные перемещения головки кости вносит небольшой участок длиной порядка 22,5 мм. Таким образом, после операции жесткость k кости, полученная на основе результатов расчетов, во всех направлениях на участке от места остеотомии до края головки существенно уменьшается (см. табл. 2). Изменение жесткости на данном участке связано с большими взаимными перемещениями фрагментов кости при нагрузках, что вызвано низким качеством их взаимной фиксации после операции и соответственно косвенно отражает необходимое время для регенерации тканей.

Таблица 2

| Направление | Жесткость кости k , Н/мм | |
|--------------|----------------------------|----------------|
| | До операции | После операции |
| Вертикальное | 574,8 | 44,9 |
| Продольное | 8708,3 | 345,4 |
| Поперечное | 387,5 | 25,0 |

Так как в вертикальном направлении кость менее жесткая, чем в продольном, а поперечная нагрузка является нетипичной при ходьбе, и кость в данном направлении имеет естественное ограничение перемещений со стороны стопы, то далее исследовано действие только вертикальной нагрузки.

В плюсневой кости до операции поле напряжений в ее субхондральных тканях при действии вертикальной силы, составляющей 10 Н, имеет максимальное значение напряжений, равное 2,45 МПа в средней части кости. После операции наблюдается повышение уровня поля напряжений в области остеотомии (рис. 4) с максимальным значением напряжений, равным 15,0 МПа в области фиксации винта.

В спонгиозной ткани плюсневой кости до операции напряжения при вертикальной нагрузке 10 Н не превышают значения 0,01 МПа, так как основную несущую функцию в данном состоянии выполняет субхондральная ткань. После операции напряжения существенно повышаются в области ус-

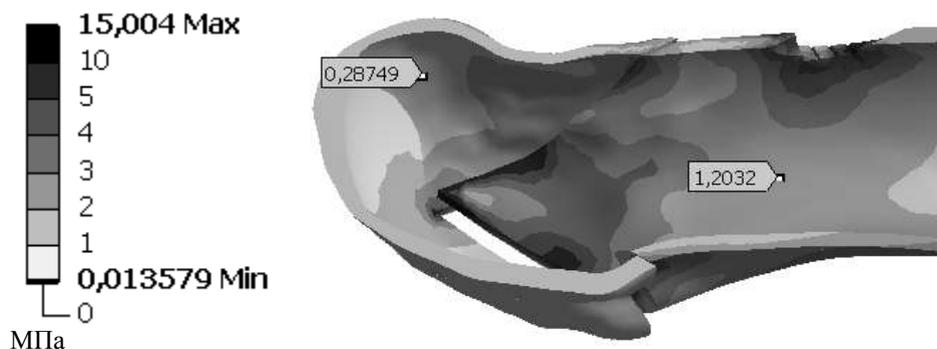


Рис. 4

тановки винта (рис. 5), так как винт соединяет спонгиозную ткань разделенных фрагментов кости. Уровень напряжений в спонгиозной ткани в области установки винта после операции повышается более чем в 20 раз. Повышение нагрузки до уровня, который является обычным для здорового состояния стопы, будет причиной разрушения спонгиозных тканей и соответственно потери целостности кости большого пальца.

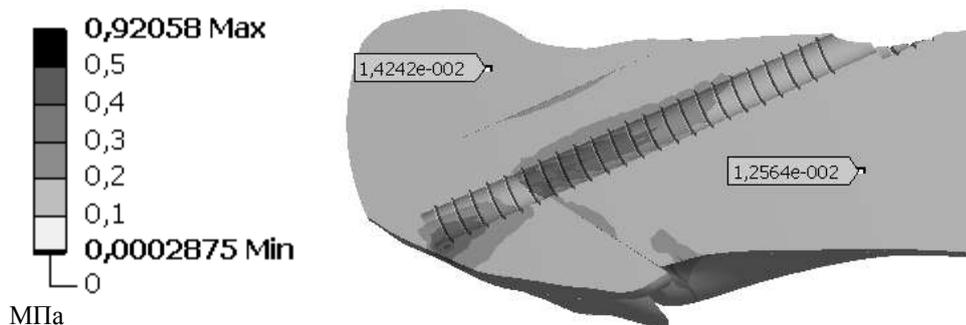


Рис. 5

Таким образом, после операции кость не способна выдержать без потери целостности полную нагрузку, характерную для ходьбы здорового человека, и даже небольшие нагрузки могут приводить к значительным взаимным перемещениям фрагментов прооперированной кости и снизить качество процесса регенерации тканей.

Полученные результаты полностью подтверждаются клиническими исследованиями. Характер операции является таким, что пациент не может реализовать полное нагружение стопы, так как при этом присутствует болевой эффект. Кроме того, нагрузка может вызвать потерю целостности рассеченной кости. Поэтому после операции пациенты используют специализированную обувь, имеющую укороченную подошву, чтобы произвести обезгруживание плюсневой отдела стопы, который подвергался оперативному вмешательству [2].

Несмотря на то, что прочность кости недостаточна для полноценных нагрузок, максимальные перемещения головки плюсневой кости при незначительных нагрузках дают представление о качестве первичной фиксации кости при их сравнении с максимальными перемещениями клинически исследованных схем операций.

На рис. 6 представлена диаграмма максимальных перемещений головки первой плюсневой кости при действии вертикальной нагрузки 10 Н для кости до операции и после шевронной остеотомии при смещении головки кости

соответственно на 3 мм и 6 мм. При увеличении смещения головки с 3 мм до 6 мм значение максимального перемещения головки увеличивается незначительно.

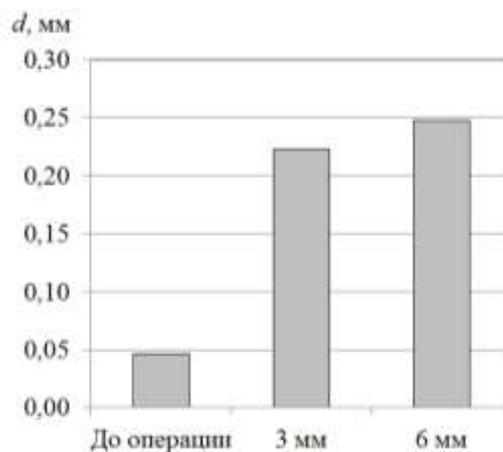


Рис. 6

Так как рассмотренные значения смещений головки кости являются границами применяемого диапазона смещений для данной операции, можно сделать вывод, что шевронная остеотомия дает с точки зрения фиксации фрагментов кости практически одинаковый результат.

Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния плюсневой кости, возникающего при шевронной остеотомии, показал, что оценка суммарных перемещений головки кости при незначительной нагрузке достаточна для количественной оценки качества фиксации фрагментов костей после операции. Анализ поля напряжений костных тканей в данном случае выполняется как вспомогательный для определения потенциальных мест разрушения в случае нарушения условий реабилитации пациента.

При моделировании шевронной остеотомии с коррекцией положения головки в диапазоне, который применяется для такого типа операций, получено практически одинаковое качество фиксации. Однако в период реабилитации полученный уровень фиксации не позволяет сохранить целостность кости при действии нагрузок, соответствующих здоровому состоянию стопы.

Полученные результаты подтверждаются медицинскими наблюдениями за пациентами, проходящими реабилитацию, а рассмотренный подход по анализу качества фиксации фрагментов костных тканей после корригирующей шевронной остеотомии может быть далее распространен на другие типы операций при hallux valgus для их сравнительной оценки между собой.

1. *Ефимов А. П.* Информативность биомеханических параметров походки для оценки патологии нижних конечностей / *А. П. Ефимов* // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т.16, №1 (55). – С.80 – 88.
2. *Диагностика и хирургическое лечение деформаций первого плюснефалангового сустава : учебно-методическое пособие / А. А. Карданов, Н. В. Загородний, Э. М. Султанов, В. Г. Процко, З. Х. Хамоков.* – Москва : «Аркомис», 2006. – 28 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 23.05.2016,
в окончательном варианте 13.06.2016

Днепропетровская государственная
медицинская академия,
Днепропетровск