

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

А. Д. Матюшонок

Белорусский государственный университет, г. Минск;

ania.matushonok.96@gmail.com;

науч. рук. – К. С. Юркевич, канд. физ.-мат наук, доц.

В настоящей работе представлены результаты определения модулей упругости регулярной пористой структуры с низкой плотностью открытых ячеек методом конечных элементов при различных радиусах поперечных сечений стержней, образующих пористую структуру и упругих свойствах материала. Параметризованная модель пористой структуры разработана в программном комплексе ANSYS. Граничные условия соответствуют одноосному нагружению образца. Выполнен сравнительный анализ модулей упругости пористых структур и усредненных модулей упругости образцов губчатой костной ткани из различных участков проксимального отдела бедренной кости человека. Модель бедренной кости разработана на основании томографических данных с учетом распределения минеральной плотности костной ткани. Определены геометрические параметры регулярной пористой структуры, при которых модуль упругости структуры совпадает с усредненным модулем упругости губчатой костной ткани. Полученные результаты могут быть использованы при разработке имплантантов для бедренных костей, используемых для проксимального отдела бедра.

Ключевые слова: регулярная пористая структура; эффективный модуль упругости; бедренная кость человека; губчатая костная ткань; радиус стержня; конечно-элементное моделирование.

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Параметризованная модель регулярной пористой структуры с низкой плотностью открытых ячеек разработана в пакете конечно-элементного анализа ANSYS APDL 17.2. Параметризация модели выполнена для автоматизированного изменения количества и геометрических размеров базовой ячейки пористой структуры, параметров радиуса поперечного сечения стержня и его физико-механических свойств. На рис. 1 в качестве примера приведена модель регулярной пористой структуры $32 \times 32 \times 32$ мм³, $8 \times 8 \times 8$ ячеек, радиус стержня $r = 0,4$ мм, модуль упругости стержня $E = 1,7$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ [1].

Граничные условия для модели соответствуют жесткому закреплению всех узлов, расположенных в плоскости $z = 0$ (узлов, принадлежащих нижнему основанию структуры). К узлам, лежащим в плоскости $z =$

h верхнего основания (h – высота пористой структуры), прикладывается вертикальная сжимающая нагрузка [1].

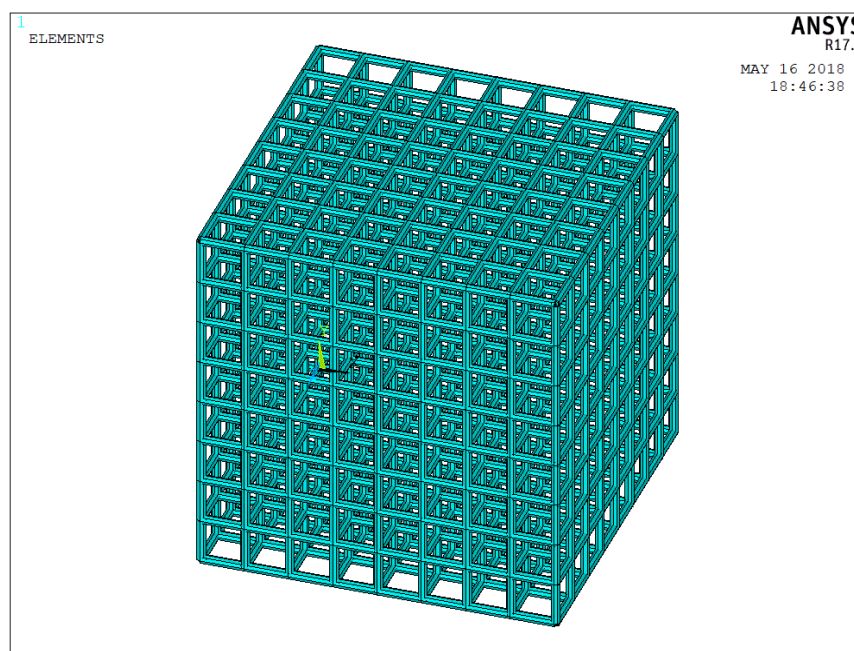


Рис. 1. Конечно-элементная модель регулярной пористой структуры с низкой плотностью открытых ячеек

Определение эффективного модуля упругости пористой структуры

Эффективный модуль упругости пористой структуры определяется следующим образом:

$$E = \frac{Pl_0}{F(u_z)_{\max}} \quad (1)$$

где E – эффективный модуль упругости; P – нормальная составляющая силы; l_0 – начальная длина; F – площадь поверхности по которой распределено действие силы; $(u_z)_{\max}$ – перемещение верхней грани вдоль оси z .

Влияние количества ячеек пористой структуры на модуль упругости

Рассмотрим три модели с различным количеством ячеек; для всех моделей шаг сетки 4 мм. Объем первой модели регулярной пористой структуры $32 \times 32 \times 32 \text{ мм}^3$ ($8 \times 8 \times 8$ ячеек), второй – $36 \times 36 \times 36 \text{ мм}^3$ ($9 \times 9 \times 9$ ячеек), третьей – $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}^3$ ($10 \times 10 \times 10$ ячеек).

Установлено, что эффективный модуль упругости не зависит от количества ячеек и составляет 70,8 МПа (радиус стержня $r = 0,4 \text{ мм}$, мо-

дуль упругости стержня $E = 1,7$ ГПа). Таким образом, можно сделать вывод, что количество ячеек не влияет на модуль упругости регулярной пористой структуры.

РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ ЧЕЛОВЕКА

При разработке конечно-элементной модели бедренной кости человека с учетом реального распределения минеральной плотности губчатой и кортикальной костной ткани было использовано 717 снимков компьютерной томографии высушенной трупной бедренной кости человека. Обработка изображений выполнена в пакете MIMICS 20.0. Упругие свойства костной ткани задавались на основании зависимости [2].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА СТЕРЖНЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

По средствам изменения радиуса стержня пористой структуры определены такие ее эффективные модули упругости, которые соответствуют усредненным модулям упругости губчатой костной ткани. Образцы губчатой костной ткани в форме параллелепипеда выделены из проксимального отдела модели бедренной кости человека. Исследуемые образцы бедренной кости обозначены на рис. 3.

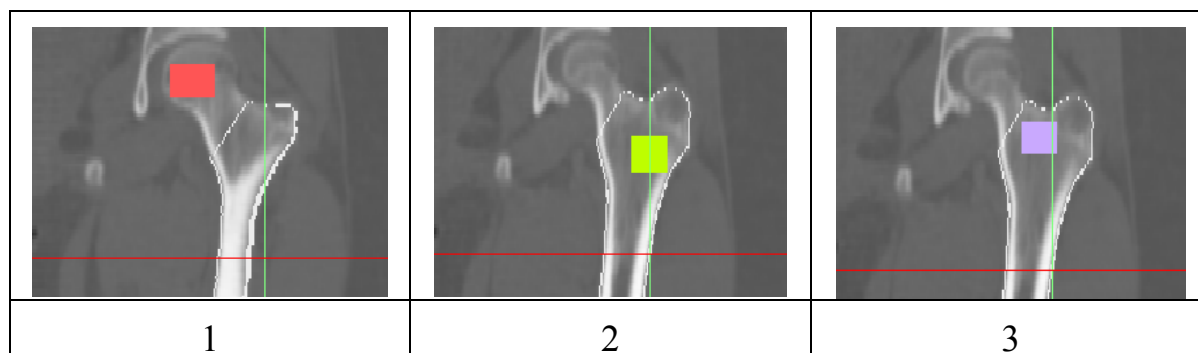


Рис. 3. Образцы: 1–3 губчатой костной ткани, использованные при определении модуля упругости

Граничные условия и нагрузки образцов костной ткани соответствуют вышеописанному закреплению и нагружению пористой структуры. Для определения усредненного модуля упругости костной ткани использовано следующее выражение:

$$\langle E \rangle = \frac{Pl_0}{F \langle u_z \rangle},$$

где $\langle E \rangle$ – усредненный модуль упругости, $\langle u_z \rangle$ – усредненное перемещение верхней грани образца, остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в формуле (1).

Радиус стержня пористой структуры выбирался таким образом, чтобы эффективные модули упругости образца и регулярной пористой структуры совпадали. Результаты определения радиуса стержня пористой структуры на основании значения усредненного модуля упругости для различных образцов костной ткани представлены в таблице.

Таблица

**Усредненные модули упругости образцов
костной ткани и соответствующие им радиусы
пористой структуры**

Образец губчатой костной ткани	1	2	3
Модуль упругости $E = \langle E \rangle$, МПа	880,24	689,1	548,87
Радиус стержня пористой структуры, мм	1,444	1,278	1,14

Таким образом, параметризованная модель регулярной пористой структуры, может быть использована для изготовления имплантантов костной ткани бедренной кости человека, предназначенных для компенсации прочности кости, подвергшейся хирургической операции. Пористая структура такового имплантанта позволит за счет заполнения костной тканью улучшить его закрепление в кости.

Библиографические ссылки

1. Luxner M. H., Stampfl J., Pettermann H. E. Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures // Journal of Materials Science. 2005. Vol. 40. P. 5859–5866.
2. Edwards W. B., Troy K. L. Finite element prediction of surface strain and fracture strength at the distal radius // Medical Engineering & Physics. 2012. Vol. 34. P. 290–298.

ВЛИЯНИЕ ОПУХОЛЕПОДОБНЫХ ПОРАЖЕНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ КОСТЕЙ

М. А. Николайчик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;
nikolaitchik.m@gmail.com;
науч. рук. – С. М. Босяков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Опухолеподобные поражения проксимального отдела бедренной кости приводят к существенному снижению прочности проксимального отдела бедра, поскольку костная ткань в этом отделе, в основном, является губчатой. Целью настоящей работы