



Т. В. Колмакова

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ГУБЧАТОЙ И КОМПАКТНОЙ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО ОБРАЗЦА КОСТИ

Исследовано влияние изменения плотности компактной и губчатой костных тканей на напряженно-деформированное состояние модельных образцов кости. Моделирование напряженно-деформированного состояния костной ткани проводилось в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Выявлено, что изменение плотности губчатой составляющей модельного образца приводит к смене преобладающего вида деформации, влияющего на распределение напряжений и деформаций.

Influence of change of density of compact and spongy bone tissue on the stress and strain state of model samples of the bone. Modeling of the stress-strain state of the bone tissue was conducted in the software package ANSYS using finite element method. It is revealed, that change of density of a spongy component of sample leads to change of a prevailing type of deformation influencing on distribution of stress and strain.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, костная ткань, напряженно-деформированное состояние.

Key words: Computer simulation, bone tissue, stress and strain state.

На сегодняшний день актуальным является исследование механического поведения костной ткани для разработки методики подбора индивидуальных механически совместимых с костной тканью имплантатов. Механические свойства костной ткани определяются ее строением и составом. Кости в своем составе имеют компактное и губчатое вещество, отличающееся пространственным расположением их структурных элементов, плотностью и минеральным содержанием [1]. В данной работе изучается влияние изменения плотности губчатой и компактной составляющих модельного образца кости на его напряженно-деформированное состояние.

Рассматривался модельный образец костной ткани, содержащий губчатую и компактную составляющие в соотношении 1:1 (рис.1).

Толщина промежуточного слоя принималась равной средней толщине трабекул в губчатой ткани человека, равной 300 мкм [2]. Моделировалось нагружение образца напряжением сжатия σ_0 вдоль оси Z (оси кости) (рис.1). Плоскость нагружения YX на рисунке 1 представлена на переднем плане, плоскость закрепления — на заднем.

Задача решалась в рамках линейной теории упругости. Модули упругости и предельные напряжения при сжатии компактной и губчатой составляющих модельного образца задавались в зависимости от их плотности и минерального содержания согласно модели Эрнандеса [3].

Плотность компактной составляющей ρ_k варьировалась от 1,6 до 1,9 г/см³, а плотность губчатой ρ_g — от 0,2 до 1,0 г/см³.

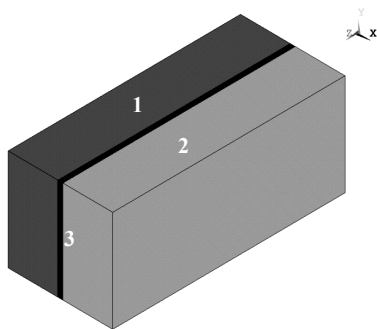


Рис. 1. Геометрическая модель костного образца:

1 – компактная составляющая; 2 – губчатая составляющая; 3 – промежуточный слой

Массовые доли минералов в компактной и губчатой костной ткани принимались равными 60 и 53 % соответственно.

Нагружение модельного образца осуществлялось до момента разрушения губчатой составляющей.

Моделирование напряженно-деформированного состояния костной ткани проводилось в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов.

На рисунке 2 представлены распределения напряжений σ_z (МПа) (рис. 2, а) и деформаций ε_z (рис. 2, б) в модельных образцах с плотностью компактной ткани $\rho_k = 1,8$ г/см³, плотностью губчатой $\rho_g = 0,2$, $\rho_g = 0,5$ и $\rho_g = 0,8$ г/см³.

Общим для всех видов образцов является то, что наибольшие по абсолютной величине сжимающие напряжения образца сконцентрированы в компактной составляющей, прилегающей к промежуточному слою. Наблюдается также наличие растягивающих напряжений в компактной составляющей образцов со стороны свободной поверхности (рис. 2, а). В губчатой составляющей вблизи плоскости нагружения локализуются наибольшие по абсолютной величине сжимающие деформации, значения которых уменьшаются по мере удаления от плоскости нагружения (рис. 2, б).

Такое распределение напряжений σ_z и деформаций ε_z определяется неравномерной деформацией образца во всех трех направлениях при осевом сжатии. Другими словами реализующиеся в разных направлениях виды деформаций (деформация сжатия в направлении оси нагружения Z, деформация растяжения в направлении оси Y и деформация изгиба в направлении оси X) в разной степени влияют на распределение напряжений и деформаций в образце вдоль оси нагружения.

На рисунке 3 представлена зависимость параметра mU_i , показывающего степень влияния на напряженно-деформированное состояние вида деформации (изгиба mU_x , растяжения mU_y , сжатия mU_z) образца, от плотности его губчатой составляющей. Параметр mU_i равен отношению значения максимального по абсолютной величине перемещения в одном из направлений системы координат к сумме максимальных по абсолютной величине перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

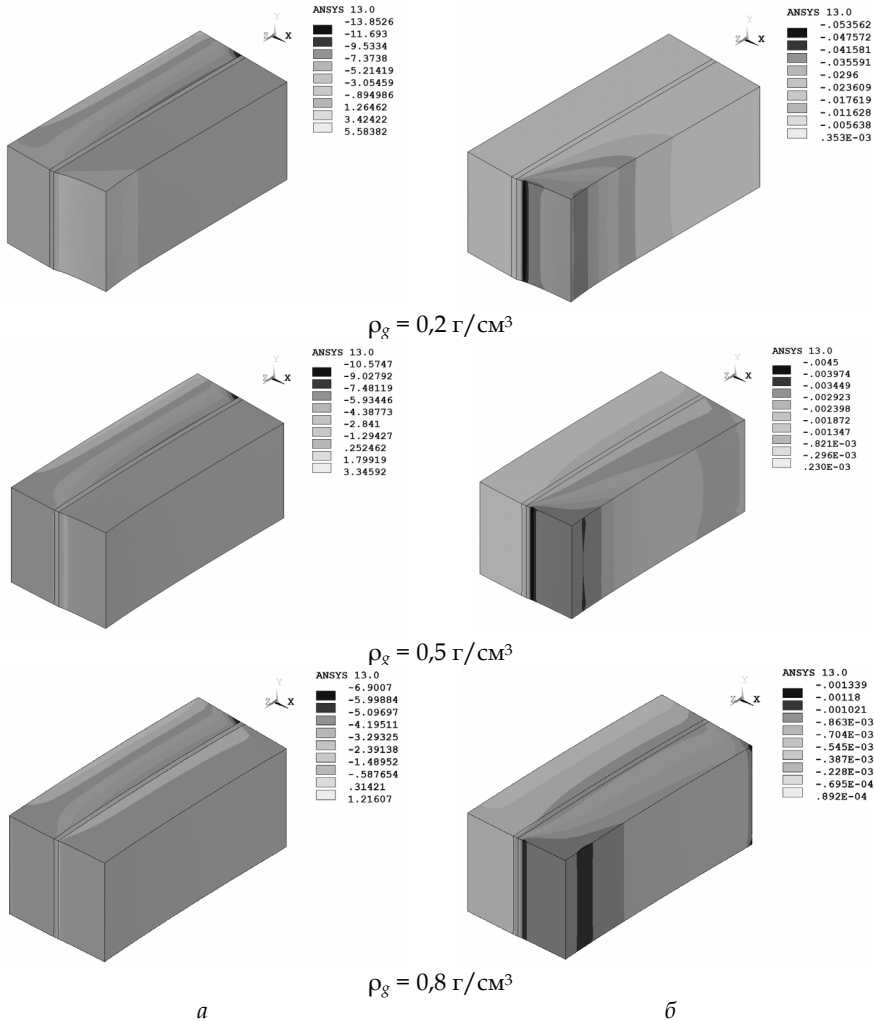


Рис. 2. Распределение напряжений σ_z (МПа) (*a*) и деформаций ϵ_z (*б*) в модельных образцах кости с плотностью компактной костной ткани $\rho_k = 1,8 \text{ г/см}^3$ при напряжении сжатия $\sigma_0 = 1,2 \text{ МПа}$

Из рисунка 3 видно, что для образцов различной плотности на распределение напряжений и деформаций в направлении оси нагружения в меньшей степени влияет деформация растяжения, реализующаяся в направлении оси Y .

Для образцов с плотностью компактной составляющей $1,8 \text{ г/см}^3$ и плотностями губчатой составляющей $< 0,5 \text{ г/см}^3$ преобладающее влияние на распределение напряжений-деформаций оказывает деформация сжатия (рис. 3), реализующаяся в направлении оси Z . Поэтому для этих образцов характерно наличие области наибольших по абсолютной величине напряжений в губчатом слое вблизи плоскости нагружения среди всего распределения напряжений губчатой составляющей (рис. 2, *a*). Для образцов с плотностями губчатой составляющей $> 0,5 \text{ г/см}^3$ преобладающее влияние оказывает деформация изгиба в

направлении оси X (рис. 3). Поэтому для этих образцов в губчатой составляющей вблизи промежуточного слоя появляется область наименьших по абсолютной величине напряжений среди всего распределения напряжений губчатой составляющей (рис. 2, a). Два вида деформации (сжатия и изгиба) в равной степени влияют на распределение напряжений и деформаций в образце с плотностью губчатой костной ткани равной $0,5 \text{ г/см}^3$ (рис. 3, отмечено вертикальной черной линией).

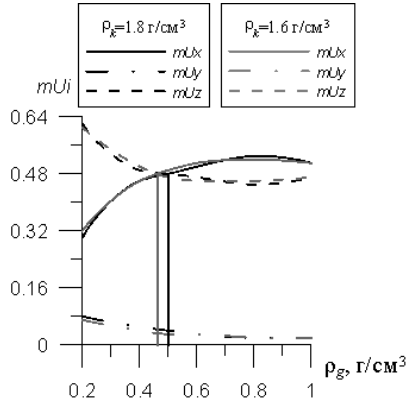


Рис. 3. Зависимость степени проявления вида деформации mU_i (изгиба mU_x , растяжения mU_y , сжатия mU_z) в одном из трех взаимно перпендикулярных направлениях от плотности губчатой составляющей образца ρ_g при плотности компактной составляющей $\rho_k = 1,8 \text{ г/см}^3$ и $\rho_k = 1,6 \text{ г/см}^3$

При понижении плотности губчатой ткани повышаются значения напряжений компактной составляющей, сконцентрированные в области промежуточного слоя (рис. 2, a), что связано с более интенсивным сжатием губчатого слоя по сравнению с компактным.

Деформация губчатой составляющей образца с увеличением ее плотности становится менее локализованной и распределяется более равномерно по всему объему (рис. 2, b), а в компактной, наоборот, с уменьшением плотности губчатой составляющей наблюдается равномерное распределение, что связано со сменой преобладающих видов деформации (рис. 3).

Снижение плотности компактной составляющей образцов с $1,8$ до $1,6 \text{ г/см}^3$ приводит к незначительному изменению степени влияния на распределение напряжений σ_z и деформаций ε_z в образцах видов деформаций, реализующихся в разных направлениях при осевом сжатии (рис. 3). При этом одинаковое влияние деформаций сжатия и изгиба на распределение напряжений и деформаций оказывается в образце с плотностью губчатой ткани $0,46 \text{ г/см}^3$.

На рисунке 4 представлены зависимости относительных усредненных по конечным элементам напряжений σ_z и деформаций ε_z в структурных составляющих образца (компактной (k), губчатой (g) и промежуточном слое (ps)) от плотности губчатой составляющей модельного образца для различных значений плотности компактной ткани.

Результаты расчетов показывают, что с уменьшением плотности губчатой костной ткани возрастают средние напряжения и сокращаются



деформации в компактной костной ткани и промежуточном слое, уменьшаются напряжения и повышается деформация в самой губчатой составляющей образца. Влияние изменения плотности компактной ткани на напряженно-деформированное состояние структурных составляющих модельного образца мало по сравнению с влиянием изменения плотности губчатой костной ткани и в большей степени проявляется при приближении значений плотности губчатой составляющей к значениям плотности компактного слоя образца (рис. 4). Сокращение плотности компактной ткани ведет к снижению в ней и промежуточном слое напряжений и повышению в них деформаций, а также к увеличению напряжений и уменьшению деформаций в губчатом слое образца.

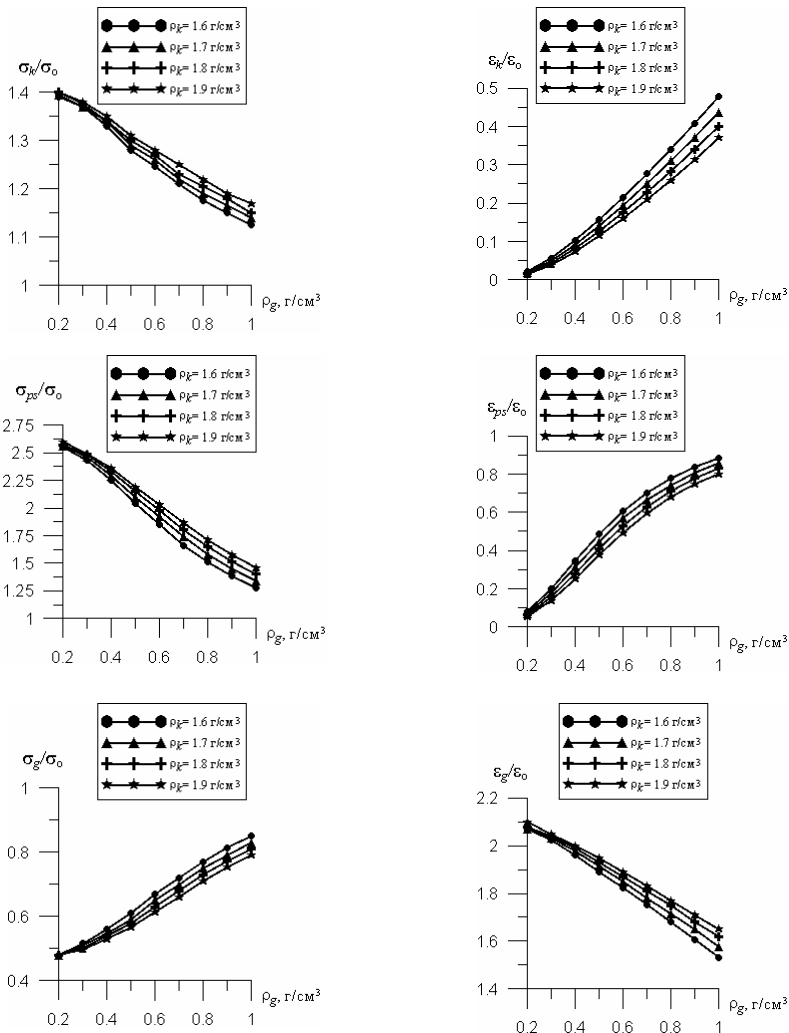


Рис. 4. Зависимости относительных усредненных по конечным элементам напряжений σ_z и деформаций ϵ_z в структурных составляющих образца (компактной (k), губчатой (g) и промежуточном слое (ps)) от плотности губчатой составляющей модельного образца для различных значений плотности компактной ткани



Зависимости относительных усредненных по конечным элементам напряжений σ_z и деформаций ϵ_z в структурных составляющих образца от плотности губчатой костной ткани имеют изгиб обратного знака. Смена знака кривых осуществляется в районе значения плотности губчатой ткани $0,5 \text{ г/см}^3$, что, вероятно, связано со сменой преобладающего вида деформации.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать соответствующие заключения и выводы:

Распределение напряжений и деформаций в образце кости при осевом сжатии, имеющем в своем составе компактную и губчатую составляющие в соотношении 1: 1 с минеральным содержанием 60 и 53 % соответственно, определяется преобладанием одного из видов деформаций — сжатия или изгиба. Для образцов с плотностью компактной составляющей $1,8 \text{ г/см}^3$ и плотностями губчатой составляющей $< 0,5 \text{ г/см}^3$ преобладающее влияние на распределение напряжений-деформаций оказывает деформация сжатия. Для образцов с плотностями губчатой составляющей $> 0,5 \text{ г/см}^3$ преобладающее влияние оказывает деформация изгиба. Для образцов с плотностью губчатой составляющей $0,5 \text{ г/см}^3$ в равной степени реализуются эти виды деформаций.

Снижение плотности компактной составляющей образца с $1,8$ до $1,6 \text{ г/см}^3$ приводит к изменению плотности губчатой составляющей с $0,5$ до $0,46 \text{ г/см}^3$, для которой в равной степени проявляются деформации сжатия и изгиба.

Уменьшение плотности губчатой костной ткани приводит к возрастанию средних напряжений и снижению средних деформаций в компактной костной ткани и промежуточном слое и сокращению средних напряжений и повышению деформаций в самой губчатой составляющей образца. Обратная ситуация реализуется в структурных составляющих образца при снижении плотности его компактного слоя.

Список литературы

1. *Архипов-Балтийский С. В.* Рассуждение о морфомеханике. Калининград, 2004.
2. *Dagan D., Béery M., Gefen A.* Single-trabecula building block for large-scale finite element models of cancellous bone // *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2004. Vol. 42. P. 549–556.
3. *Hernandez C. J.* Simulation of bone remodeling during the development and treatment of osteoporosis. PhD Thesis. Stanford University, 2001.

Об авторе

Татьяна Витальевна Колмакова — канд. физ. мат. наук, доц., Томский государственный университет.

E-mail: kolmakova@ftf.tsu.ru

About the author

Dr. Tatiana Kolmakova — Ass. Prof., Tomsk State University.

E-mail: kolmakova@ftf.tsu.ru