ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 55, № 9/3 ФИЗИКА 2012

УДК 539.3

Т.В. КОЛМАКОВА

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Представлены результаты компьютерного моделирования деформационного поведения модельных образцов костной ткани, содержащих компактную и губчатую составляющие, при осевом сжатии. Плотность компактной костной ткани принималась равной 1,8 г/см^3, плотность губчатой варьировалась от 0,2 до 1,0 г/см^3. Результаты расчетов показали, что для образцов, подвергнутых осевому сжатию, реализуются три вида деформации в трех взаимно перпендикулярных направлениях: деформация сжатия, деформация изгиба и деформация растяжения. Степень проявления того или иного вида деформации определяется плотностью губчатой составляющей.

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

Решением проблемы восстановления костных тканей при заболеваниях, связанных с воспалительными процессами, онкологией, является механическое замещение дефекта кости имплантатом. Наряду с требованием биосовместимости, предъявляемым к имплантатам, возникает необходимость подбора их механических свойств, близких к таковым природной костной ткани [1]. Механические свойства костной ткани определяются ее строением и составом. Кости в своем составе имеют компактное и губчатое вещество, отличающиеся пространственным расположением их структурных элементов, размером и объёмной долей пор, минеральным содержанием [2].

В отличие от компактной, плотность губчатой костной ткани сильно варьируется в зависимости от ее анатомического положения [3].

Таким образом, для разработки и подбора индивидуальных имплантатов актуальным является исследование деформационного поведения костной ткани с учетом особенностей ее строения и состава.

Моделировалось деформационное поведение образца костной ткани, содержащего губчатую и компактную составляющие в соотношении 1:1 при осевом сжатии вдоль оси *Z*. Плотность компактной составляющей ρ_k принималась равной 1,8 г/см^3, а плотность губчатой ρ_g варьировалась от 0,2 до 1,0 г/см^3.

Модули упругости *E* (ГПа) на сжатие компактной (k) и губчатой (g) составляющих образца задавались в зависимости от их плотности ρ (г/см^3) согласно модели Эрнандеса [4]. Массовые доли минералов в компактной и губчатой костной ткани принимались равными 60 и 53 % соответственно:

$$E_k = 2,78\rho_k^{2,58}, \qquad E_g = 2,21\rho_g^{2,58}.$$

На рис. 1 представлены распределения перемещений в образцах с плотностями губчатой ткани 0,2 г/см^3 (*а*, *в*, *д*) и 1,0 г/см^3 (*б*, *г*, *е*). Плоскость нагружения *YX* на рисунках представлена на переднем плане, плоскость закрепления – на заднем плане. Модельные образцы состоят из слоев губчатой (правая часть образца) и компактной (левая часть образца) костной ткани.

При осевом сжатии образцов вдоль оси Z с плотностью губчатой костной ткани 0,2 г/см^3 наибольшие по образцу перемещения в каждом из трех направлений *X*, *Y*, *Z* сосредоточены в малой области губчатой составляющей вблизи плоскости нагружения (рис. 1, *а*, *в*, *д*). По мере повышения плотности губчатой составляющей до 1,0 г/см^3 перемещениям подвержена большая часть объема образца, включая компактную составляющую (рис. 1, *б*, *г*, *е*). Причем значения перемещений в образце с плотностью губчатой костной ткани 1,0 г/см^3 становятся меньше, чем в образце с плотностью 0,2 г/см^3.

Представленные результаты позволяют заключить, что по мере увеличения плотности губчатой составляющей, т.е приближения значения плотности губчатой составляющей к значению плотности компактной составляющей образца, происходит более равномерное деформационное поведение образца в разных направлениях.

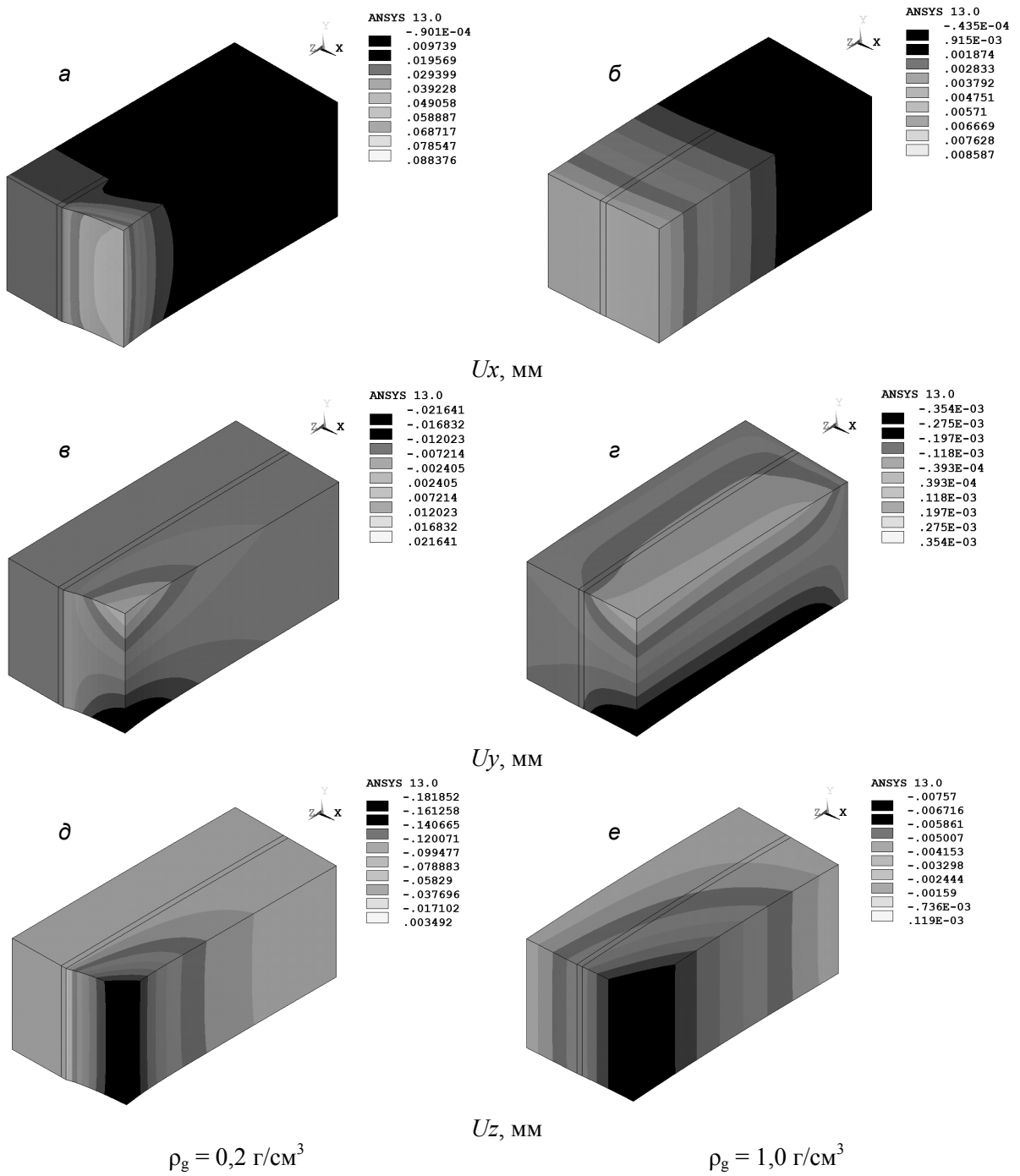

Рис. 1. Распределение перемещений по образцам с плотностью компактной костной ткани ρ_k = = 1,8 г/см^3 и плотностью губчатой костной ткани ρ_g = 0,2 и 1,0 г/см^3 при напряжении сжатия σ_o = 1,2 МПа

Результаты расчетов показывают, что при осевом сжатии в направлении оси *Z* в образцах кости с отличной плотностью губчатой составляющей в разной степени реализуются три вида деформации: деформация сжатия в направлении оси *Z*, деформация изгиба в направлении оси *X* и деформация растяжения в направлении оси *Y*.

На рис. 2 представлена зависимость параметра *mUi*, показывающего степень проявления какого-либо механизма деформации (изгиба – *mUx*, растяжения – *mUy*, сжатия – *mUz*), от плотности губчатой составляющей образца. Параметр *mUi* 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.

Видно, что в меньшей степени по сравнению с остальными видами деформаций реализуется деформация растяжения вдоль оси *Y* (рис. 2, кривая *2*). Остальные два вида деформации, а именно изгиб (рис. 2, кривая *1*) и сжатие (рис. 2, кривая *3*), конкурируют между собой, и какой механизм будет преобладающим, зависит от плотности губчатой составляющей образца.

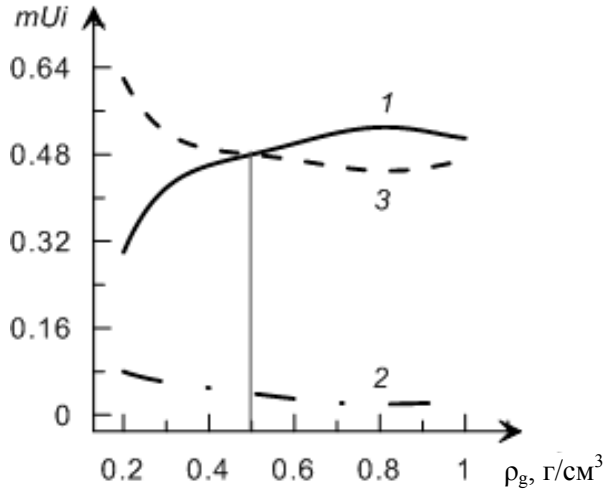

Рис. 2. Зависимость степени проявления вида деформации *mUi* (кр. *1* – изгиба – *mUx*, кр. *2* – растяжения – *mUy*, кр. *3* – сжатия – *mUz*) в одном из трех взаимно перпендикулярных направлениях от плотности губчатой составляющей образца ρ_g

Так, для плотностей губчатой составляющей < 0,5 г/см^3 преобладающей является деформация сжатия в направлении оси *Z* (рис. 2, кривая *3*). Для плотностей губчатой составляющей образца > 0,5 г/см^3 преобладает деформация изгиба в направлении оси *X* (рис. 2, кривая *1*). Эти два вида деформации в равной степени проявляются в образце с плотностью губчатой костной ткани равной 0,5 г/см^3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путляев В. И. // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8. – № 1. – С. 44–50.
2. Архипов-Балтийский С. В. Рассуждение о морфомеханике. – Калининград: Норма, 2004. – 820 с.
3. Goldstein S.A. // J. Biomechanics. – 1987. – V. 20. – No. 11–12. – P. 1055–1061.
4. Hernandez C.J. Simulation of Bone Remodeling During the Development and Treatment of Osteoporosis, PhD Thesis. – Stanford University, 2001. – 356 p.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия
E-mail: kolmakova@ftf.tsu.ru

Поступила в редакцию 10.07.12.

Колмакова Татьяна Витальевна, к.ф.-м.н., доцент.