

Гений ортопедии. 2022. Т. 28, № 4. С. 559-564.
Genij Ortopedii. 2022. Vol. 28, no. 4. P. 559-564.

Научная статья

УДК 611.018.41:539.32:616.717.16

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-4-559-564>



Исследование механических свойств костной ткани

М.Ю. Удинцева¹, Д.В. Зайцев^{2,3}, Е.А. Волокитина^{1✉}, И.П. Антропова¹, С.М. Кутепов¹

¹ Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Александровна Волокитина, volokitina_elena@rambler.ru

Аннотация

Введение. Изучение прочностных свойств трабекулярной кости области вертлужной впадины в зависимости от возраста и пола пациентов позволяет создать теоретическую основу для разработки костнозамещающих конструкций. **Цель.** Определить механические характеристики костной ткани наацетабулярной области у пациентов разного пола и разных возрастных групп. **Материалы и методы.** Исследовался кадаверный материал 60 лиц обоего пола: 20 – молодого возраста (от 18 до 44 лет), 20 – среднего возраста (от 45 до 59 лет) и 20 пожилого возраста (от 60 до 74 лет). Из наацетабулярной области при помощи остеотома извлекались фрагменты костной ткани размером 3 × 3 × 1,5 см. Из данных фрагментов при помощи корончатой фрезы изготавливались образцы цилиндрической формы диаметром 6 мм и высотой 9 мм. Все образцы подвергались одноосному сжатию со скоростью нагружения 1 мм/мин. **Результаты.** Сравнение исследуемого материала лиц мужского пола по максимальному напряжению, модулю упругости и упругой деформации не выявило возрастных различий ($p > 0,05$). В образцах лиц женского пола разного возраста статистически значимо отличалась величина упругой деформации как при множественном анализе, так и при попарном сравнении групп ($p < 0,05$). По максимальному напряжению и модулю упругости у женщин статистически значимой разницы также не выявлено ($p > 0,05$). **Обсуждение.** Полученные данные о механическом поведении трабекулярной кости и значения параметров прочности объясняются расположением в пространстве волокон структурных белков, профилем шивки коллагена, степенью минерализации матрикса, структурой гидроксиапатита и количеством связанной воды. **Заключение.** В исследованных образцах лиц мужского пола механические характеристики трабекулярной кости наацетабулярной области значимо не изменялись в зависимости от возраста. У женщин с возрастом статистически значимо увеличивалась величина упругой деформации. Максимальное напряжение и упругий модуль у женщин разного возраста изменений не показали.

Ключевые слова: трабекулярная костная ткань, наацетабулярная область, механические свойства, одноосное сжатие, эндопротезирование тазобедренного сустава

Для цитирования: Исследование механических свойств костной ткани наацетабулярной области / М.Ю. Удинцева, Д.В. Зайцев, Е.А. Волокитина, И.П. Антропова, С.М. Кутепов // Гений ортопедии. 2022. Т. 28, № 4. С. 559-564. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-4-559-564. EDN RRFQOO.

Original article

Investigation of bone tissue mechanical properties in the supra-acetabular region

M.Yu. Udintseva¹, D.V. Zaitsev^{2,3}, E.A. Volokitina^{1✉}, I.P. Antropova¹, S.M. Kutepov¹

¹ Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

Corresponding author: Elena A. Volokitina, volokitina_elena@rambler.ru

Abstract

Introduction The investigation of the trabecular bone strength in the acetabular area and its dependence on age and gender may provide a theoretical basis for the development of implants for bone replacement. **The purpose** of this study was to determine the mechanical characteristics of the bone tissue in the supra-acetabular region in patients of different age groups. **Materials and methods** The cadaveric material of 60 patients was studied and included 20 young patients (age range, 18 to 44), 20 middle-aged patients (age range 45 to 59) and 20 elderly patients (age range, 60 to 74). Fragments of bone tissue 3 × 3 × 1.5 cm in size were removed from the supra-acetabular region using an osteotome. Cylindrical specimens, 6 mm in diameter and 9 mm high, were produced from these fragments using a crown cutter. All samples were subjected to uniaxial compression at a loading rate of 1 mm/min. **Results** Comparison of male patients for each of the mechanical parameters did not reveal age differences ($p > 0.05$). In women of different age groups, the magnitude of elastic deformation was significantly different both by multiple analysis and in pairwise comparison of groups ($p < 0.05$). There was also no statistically significant difference in the maximum stress and modulus of elasticity in women ($p > 0.05$). **Discussion** The data obtained on the mechanical behavior of the trabecular bone and the values of the strength parameters are explained by the spatial arrangement of the fibers of structural proteins, the cross-linking profile of collagen, the degree of matrix mineralization, the structure of hydroxyapatite, and the amount of bound water. **Conclusion** In male patients, mechanical characteristics of the bone tissue in the supra-acetabular region do not change significantly with age. In women, the value of elastic deformation increases significantly with age. The maximum tensile strength and modulus of elasticity in women of different ages did not show any changes.

Keywords: trabecular bone tissue, supra-acetabular region, mechanical properties, uniaxial compression, hip arthroplasty

For citation: Udintseva M.Yu., Zaitsev D.V., Volokitina E.A., Antropova I.P., Kutepov S.M. Investigation of bone tissue mechanical properties in the supra-acetabular region. *Genij Ortopedii*, 2022, vol. 28, no 4, pp. 559-564. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-4-559-564.

ВВЕДЕНИЕ

При хирургических вмешательствах на тазобедренном суставе актуальной является проблема восстановления дефектов костной ткани в области вертлужной впадины для обеспечения стабильной фиксации тазового компонента эндопротеза и адекватного остеосинтеза при травме [1–4].

Проблема возрастного остеопороза, а также снижение качества кости в результате тяжелых соматических и системных заболеваний соединительной ткани остается актуальной для травматологов-ортопедов. Низкий модуль упругости костной ткани существенно ограничивает врача в выборе остеозамещающих материалов,

эндопротезов, фиксаторов для остеосинтеза [5–7]. Изучение усредненных механических показателей прочности кости пациентов в зависимости от возраста и пола позволяет создать теоретическую основу для разработки как индивидуальных костнозамещающих конструкций, так и для проектирования производства таких медицинских изделий в промышленных масштабах [8, 9].

Точка максимального напряжения является характеристикой, определяющей максимальную нагрузку, которую кость способна выдержать без разрушения. Модуль Юнга характеризует жесткость материала при упругой деформации. Чем образец жестче, тем большую нагрузку нужно приложить к нему, чтобы его

деформировать. Величина упругой деформации определяет, насколько можно деформировать образец без необратимых изменений в его микроструктуре [10]. Все перечисленные характеристики следует учитывать при разработке материалов (титан, керамика) для замещения дефектов трабекулярной (губчатой) костной ткани с целью недопущения перифокальной резорбции кости по причине более высоких значений механических свойств искусственных материалов в сравнении с костью пациента [11–14].

Цель настоящего исследования – определить механические характеристики костной ткани надацетабулярной области у лиц разных возрастных групп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Набор материала осуществлялся на базе патологоанатомического отделения МАУ ЦГКБ № 24 г. Екатеринбург. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Уральского государственного медицинского университета (протокол № 9 от 22.10.21). Критерием включения являлся соответствующий задачам исследования возраст, критерием исключения – наличие тяжелой патологии тазобедренного сустава (коксартроз 3–4 стадии). Исследовался кадаверный материал 60 лиц обоего пола: 20 – молодого возраста (от 18 до 44 лет), 20 – среднего возраста (от 45 до 59 лет) и 20 – пожилого возраста (от 60 до 74 лет). Разделение по возрасту проводилось по классификации ВОЗ. В исследование был включен материал 13 мужчин и 7 женщин молодого возраста, 11 мужчин и 9 женщин среднего возраста, 9 мужчин и 11 женщин пожилого возраста.

Из надацетабулярной области при помощи остеотома извлекались фрагменты костной ткани размером примерно $3 \times 3 \times 1,5$ см. Из данных фрагментов при помощи корончатой фрезы изготавливались по три образца цилиндрической формы диаметром 6 мм и высотой 9 мм. Фрезу ориентировали перпендикулярно суставному хрящу. Поверхности сжатия заготовок шлифовали алмазным диском до достижения их плоскопараллельности. Размеры костных цилиндров из-

меряли микрометром (погрешность 0,01 мм). Процесс подготовки образцов представлен на рисунке 1.

Все образцы подвергались одноосному сжатию со скоростью нагружения 1 мм/мин. Направление приложения силы соответствовало физиологической нагрузке кости данной локализации. Эксперимент осуществлялся с помощью разрывной/испытательной машины Shimadzu AG-X50kN (Япония). При проведении исследований нижняя площадка испытательной машины остается неподвижной, напряжение создается движением верхней плиты с заданной постоянной скоростью.

Статистический анализ данных проводился в программе Statistica 8.0. Нормальность распределения признаков оценивалась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Проверка результатов определения модуля упругости, максимального напряжения и упругой деформации с использованием данного критерия выявила отсутствие нормальности распределения полученных данных как при изучении материала лиц мужского пола, так и женского. В связи с этим использовались непараметрические критерии: для определения значимости различий между группами применяли критерий Краскела-Уоллиса, попарное сравнение групп проводили с помощью критерия Манна-Уитни.

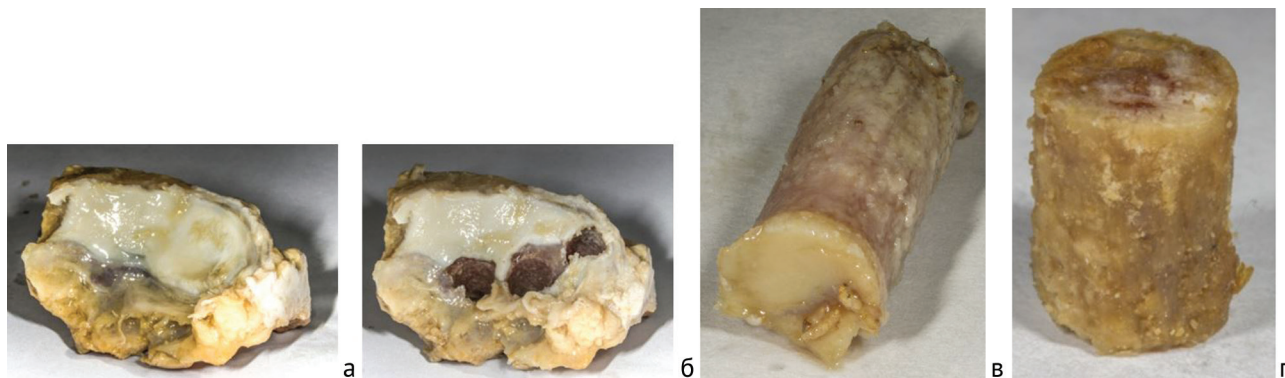


Рис. 1. Этапы подготовки образцов для механических испытаний: а – фрагмент костной ткани надацетабулярной области; б – фрагмент костной ткани после рассверливания; в – цилиндрическая заготовка с фрагментом суставного хряща; г – готовый образец для механических испытаний

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные, полученные при определении механических свойств костной ткани надацетабулярной области

лиц мужского и женского пола различных возрастных групп, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства костной ткани надцетабулярной области в образцах, полученных из материала лиц мужского и женского пола, в зависимости от возрастной группы (по классификации ВОЗ)

Возрастная группа	Пол	Молодой возраст (18–44 лет)	Средний возраст (45–59 лет)	Пожилый возраст (60–74 года)	p1
Упругий модуль, ГПа	мужчины	0,10 [0,05; 0,27]	0,11 [0,09; 0,16]	0,13 [0,11; 0,18]	0,619
	женщины	0,13 [0,09; 0,23]	0,17 [0,05; 0,22]	0,07 [0,04; 0,12]	0,172
p2		0,445	0,668	0,016	
Максимальное напряжение, МПа	мужчины	3,08 [1,97; 4,98]	2,98 [1,97; 4,14]	3,49 [2,77; 5,09]	0,770
	женщины	3,06 [2,67; 5,70]	3,84 [1,92; 7,13]	3,23 [1,86; 3,66]	0,886
p2		0,744	0,646	0,681	
Упругая деформация, %	мужчины	3,57 [3,15; 4,30]	4,14 [3,38; 5,16]	3,55 [2,82; 5,64]	0,568
	женщины	3,36 [2,96; 4,08]	4,45 [4,11; 6,52]	9,98 [5,93; 12,44]	0,003
p2		0,326	0,330	0,007	

Парные сравнения между группами выявили различия в образцах молодых и пожилых женщин, $p = 0,002$.

Примечание: данные представлены в виде: медиана [интерквартильный размах]: p1 – критерий Краскела-Уоллиса (сравнение между возрастными группами); p2 – критерий Манна-Уитни (сравнение между мужчинами и женщинами).

Сравнение образцов лиц мужского пола молодого, среднего и пожилого возраста по величине упругого модуля, максимального напряжения и упругой деформации не выявило возрастных различий ни по одному из механических показателей.

В материале женщин разных возрастных групп не выявлено значимых различий при определении максимального напряжения и модуля упругости. В то же время при множественном сравнении групп были обнаружены существенные различия по величине упругой деформации. Проведение дальнейшего парного сравнения групп показало наличие статистически значимых различий по данному показателю в образцах женщин молодого и пожилого возраста.

Под воздействием сжимающих нагрузок не наблюдалось разрушения образца на отдельные фрагменты. Происходило его постепенное расплющивание с уменьшением высоты и увеличением диаметра. При этом снижение высоты происходило неравномерно по всему объему: наиболее значимые изменения произошли в верхней части образца, ближе к поверхности (рис. 2, 3).

В молодой и средней возрастной группе различия между мужской и женской костью по механическим свойствам не выявлены. В пожилом возрасте мужская кость значительно превосходит женскую по жесткости (упругий модуль значимо выше). Костная ткань женщин пожилого возраста легче деформируется, но обладает большей способностью к восстановлению своей первоначальной формы, чем мужская костная ткань (величина упругой деформации значимо выше).

Деформационная кривая показывает зависимость напряжения в костной ткани от величины деформации. На данном графике, составленном для трабекулярной костной ткани надцетабулярной области при одноосном сжатии, наблюдается участок, характеризующий упругие свойства кости (линейный участок). Далее следует значительный участок, где деформация носит необратимый характер. При этом на данном участке происходят незначительные периодические колебания напряжения в кости (рис. 4, 5).

Приведенные выше закономерности в механическом поведении образцов характерны как для мужской кости, так и для женской.



Рис. 2. Исходный образец



Рис. 3. Образец после механических испытаний на одноосное сжатие

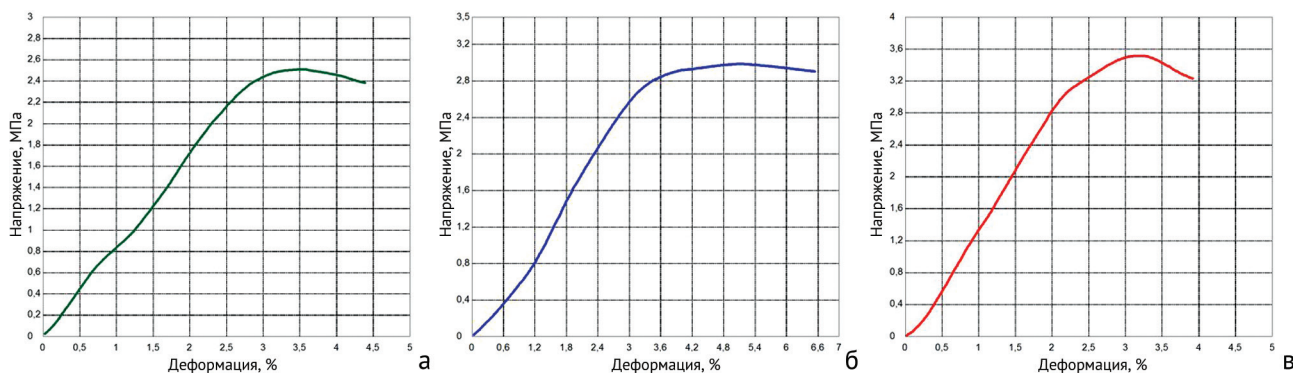


Рис. 4. Графики деформационного поведения костной ткани образцов от лиц мужского пола разных возрастных групп: а – молодого возраста; б – среднего возраста; в – пожилого возраста

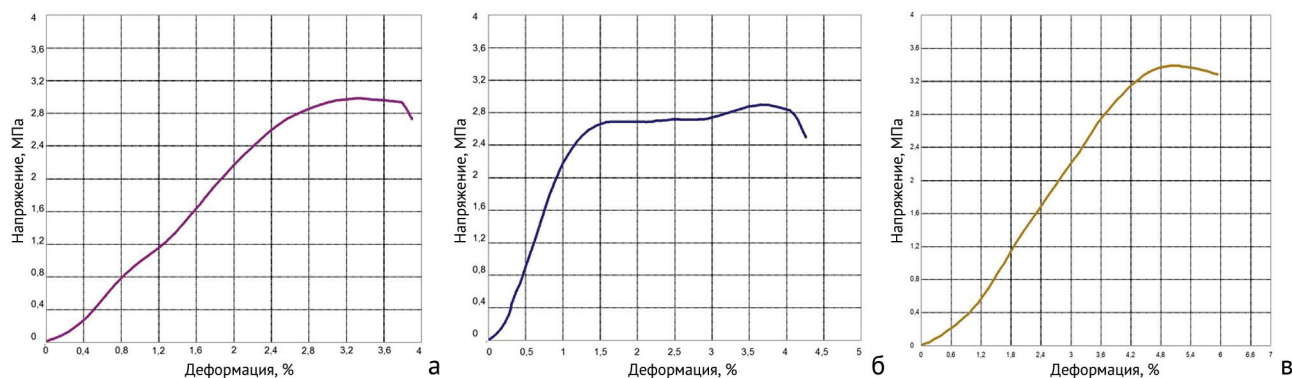


Рис. 5. Графики деформационного поведения костной ткани образцов от лиц женского пола разных возрастных групп: а – молодого возраста; б – среднего возраста; в – пожилого возраста

ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку костная ткань неоднородна по своим основным компонентам (органический матрикс и минералы), взаимосвязь между механическими свойствами на местном тканевом уровне и общей стойкостью к разрушению трудно поддается количественной оценке [15, 16]. Предполагаемые детерминанты механического поведения костной ткани включают ориентацию коллагена, профиль сшивки коллагена, степень минерализации или соотношение минералов к матрице, связанную воду и минеральную структуру. Однако такие свойства как прочность и ударная вязкость, по данным Hart N.H., Nimphius S., Rantalainen T., Ireland A. et al. (2017), зависят от объемных характеристик пористости и способа соединения органических и неорганических компонентов костной ткани между собой [17].

Механические свойства кости на тканевом уровне, по результатам исследований Nyman J.S., Granke M., Singleton R.C. et al. (2016) и Morgan E.F., Unnikrisnan G.U., Hussein A.I. (2018), зависят от ультраструктурной организации коллагеновых фибрилл типа I, наполненных полукристаллическим карбонизированным гидроксипатитом, а не от микроскопической пористости (каналы Гаверса) [18, 19]. Kokot G., Makuch A., Skalski K. et al. (2018) высказали интересную гипотезу о том, что модуль упругости кости на тканевом уровне и некоторые другие механические параметры определяются генетически и практически не изменяются с возрастом или при остеопорозе [20].

Таким образом, биомеханическое взаимодействие (напряженно-деформированное состояние) костной ткани и имплантата зависит как от структурных параметров кости, определяемых возрастом, состоянием здоровья и генетическими особенностями пациента, так и от характеристик материала имплантата, в частности, от его модуля упругости. Напряжения в костной ткани нелинейно возрастают при увеличении толщины кортикального слоя, его минеральной плотности и при уменьшении модуля упругости имплантата. Деформационная способность биомеханической системы «кость – имплантат» возрастает при уменьшении толщины и минеральной насыщенности кортикального слоя, модуля упругости имплантата [21, 22, 23]. Инди-

видуальный подбор упругого модуля остеозамещающего материала для пациента должен осуществляться в зависимости от анатомической локализации дефекта кости.

При одинаковых параметрах образцов нативной кости механические параметры существенно различаются в различных участках как одной и той же кости, например, бедренной, так и в разных сегментах скелета [24, 25]. В работах М.В. Гилева и соавторов показано, что при механическом воздействии на костные участки плато большеберцовой кости, дистального эпиметафиза лучевой кости и суставных поверхностей пяточной кости происходят изменения на всех структурных уровнях ее организации. Различные по интенсивности и вектору приложения силы нагрузки, согласно закону Вольфа, формируют уникальный химический состав и взаимоотношение элементов белковой матрицы и кристаллов минералов в составе кости. Микроархитектоника кости в конкретном сегменте опорно-двигательного аппарата определяет характер перелома и вероятность возникновения дефекта костной ткани [26, 27].

При проектировании и отборе остеозамещающих материалов рекомендуется использовать следующие характеристики: модуль упругости, размер пор, предел прочности [28, 29, 30]. Пористая структура имплантатов с градиентной плотностью позволяет кости врастать в него. При использовании материала с похожим на костную ткань человека градиентом структуры, обеспечивающим близкие к параметрам кости механические свойства, вероятность успешной остеоинтеграции повышается. Это объясняется более интенсивным механическим воздействием градиентного имплантата на окружающую кость, чем воздействие однородного материала. При этом механическое напряжение в системе «кость – градиентный имплантат» не превышает физиологические значения, которые возникают в неповрежденной кости. При описанных выше условиях снижается вероятность возникновения явления экранирования напряжения на стыке материала и кости, что способствует предупреждению асептической неустойчивости имплантата [31, 32].

ВЫВОДЫ

1. Механические характеристики костной ткани на-дацетабулярной области колеблются в небольшом диапазоне значений.

2. У лиц мужского пола механические характеристики значимо не изменяются в зависимости от возраста. У женщин с возрастом статистически значимо увеличивается величина упругой деформации. Максимальное напряжение и упругий модуль у женщин разного возраста изменений не показали.

3. В молодом и среднем возрасте костная ткань мужчин и женщин не отличается по механическим свойствам. В пожилом возрасте у мужчин костная ткань более жесткая, у женщин в пожилом возрасте

кость лучше восстанавливает свою форму после нагрузки.

4. Костная ткань на-дацетабулярной области при сжимающих нагрузках способна к частичному восстановлению формы после снятия нагрузки. Высокая пористость кости обуславливает необратимое изменение ее формы путем послойного уплотнения и разрушения микроструктуры без распада на отдельные фрагменты.

5. Установленные значения модуля упругости, максимального напряжения и упругой деформации могут служить ориентирами при подборе остеозамещающих материалов для замещения дефектов костной ткани на-дацетабулярной области пациентам различных возрастных групп.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Расчетное исследование прочности эндопротеза из материала с градиентной ячеистой структурой / В.Ш. Суфияров, А.В. Орлов, А.А. Попович, М.О. Чуковенкова, А.В. Сохлаков, Д.С. Михалюк // Российский журнал биомеханики. 2021. Т. 25, № 1. С. 64-77.
2. Impaction grafting of the acetabulum with ceramic bone graft substitute mixed with femoral head allograft: high survivorship in 43 patients with a median follow-up of 7 years: a follow-up report / M.R. Whitehouse, P.J. Dacombe, J.C. Webb, A.W. Blom // Acta Orthop. 2013. Vol. 84, No 4. P. 365-370. DOI: 10.3109/17455674.2013.792031.
3. Среднесрочные результаты ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава с использованием ацетабулярных аугментов / А.А. Корыткин, Я.С. Новикова, К.А. Ковалдов, С.Б. Королёв, А.А. Зыкин, С.А. Герасимов, Е.А. Герасимов // Травматология и ортопедия России. 2019. Т. 25, № 1. С. 9-18. DOI: 10.21823/2311-2905-2019-25-1-9-18.
4. The effects of revision total hip arthroplasty on Medicare spending and beneficiary outcomes: implications for the comprehensive care for joint replacement model / L. Koenig, C. Feng, F. He, J.T. Nguyen // J. Arthroplasty. 2018. Vol. 33, No 9. P. 2764-2769.e2. DOI: 10.1016/j.arth.2018.05.008.
5. Relating mechanical properties of vertebral trabecular bones to osteoporosis / R. Cesar, J. Bravo-Castillero, R.R. Ramos, C.A.M. Pereira, H. Zanin, J.M.D.A. Rollo // Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin. 2020. Vol. 23, No 2. P. 54-68. DOI: 10.1080/10255842.2019.1699542.
6. Medial acetabular wall breach in total hip arthroplasty – is full-weight-bearing possible? / F. Mandelli, S. Tiziani, J. Schmitt, C.M.L. Werner, H.P. Simmen, G. Osterhoff // Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2018. Vol. 104, No 5. P. 675-679. DOI: 10.1016/j.otsr.2018.04.020.
7. Двухэтапное ревизионное эндопротезирование тазобедренного сустава при обширном дефекте костной ткани вертлужной впадины (случай из практики) / В.В. Павлов, И.В. Кирилова, М.В. Ефименко, В.А. Базлов, Т.З. Мамуладзе // Травматология и ортопедия России. 2017. Т. 23, № 4. С. 125-133. DOI: 10.21823/2311-2905-2017-23-4-125-133.
8. Механосенситивность различных клеток: возможная роль в регуляции и реализации эффектов физических методов лечения (обзор) / Ю.П. Потехина, А.И. Филипова, Е.С. Трегубова, Д.Е. Мохов // Современные технологии в медицине. 2020. № 4. С. 77-90.
9. Моделирование микроокружения мезенхимных стволовых клеток как перспективный подход к тканевой инженерии и регенеративной медицине (краткий обзор) / И.А. Хлусов, Л.С. Литвинова, К.А. Юрова, Е.С. Мелашенко, О.Г. Хазиахматова, В.В. Шуплецова, М.Ю. Хлусова // Бюллетень общероссийской медицины. 2018. Т. 17, № 3. С. 217-229.
10. Гаврюшенко Н.С., Батраков С.Ю., Баламетов С.Г. Сравнительная характеристика механико-прочностных свойств углеродного наноструктурного имплантата и нативной кости // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2020. Т. 19, № 1. С. 108-115.
11. Micro-CT based finite element modelling and experimental characterization of the compressive mechanical properties of 3-D zirconia scaffolds for bone tissue engineering / E. Askari, I.F. Cengiz, J.L. Alves, B. Henriques, P. Flores, M.C. Fredel, R.L. Reis, J.M. Oliveira, F.S. Silva, J. Mesquita-Guimarães // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2020. Vol. 102. P. 103516. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.103516.
12. Chahal S., Kumar A., Hussian F.S.J. Development of biomimetic electrospun polymeric biomaterials for bone tissue engineering. A review // J. Biomater. Sci. Polym. Ed. 2019. Vol. 30, No 14. P. 1308-1355. DOI: 10.1080/09205063.2019.1630699.
13. Defektadaptierte azetabuläre Versorgung mit der Trabecular-Metal-Technologie / G.I. Wassilew, V. Janz, C. Perka, M. Müller // Orthopäde. 2017. Vol. 46, No 2. P. 148-157. DOI: 10.1007/s00132-016-3381-3.
14. Sufiarov V.S., Borisov E.V. Effect of heat treatment modes on the structure and properties of alloy VT6 after selective laser melting // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Vol. 60, No 1-2. P. 745-748. DOI: 10.1007/s11041-019-00350-0.
15. Dumas M., Terriault P., Brailovski V. Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials // Materials and Design. 2017. Vol. 121. P. 383-392. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.021.
16. Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action / N.H. Hart, S. Nimphius, T. Rantalainen, A. Ireland, A. Sifariakas, R.U. Newton // J. Musculoskelet. Neuronal Interact. 2017. Vol. 17, No 3. P. 114-139.
17. Tissue-Level Mechanical Properties of Bone Contributing to Fracture Risk / J.S. Nyman, M. Granke, R.C. Singleton, G.M. Pharr // Curr. Osteoporos. Rep. 2016. Vol. 14, No 4. P. 138-150. DOI: 10.1007/s11914-016-0314-3.
18. Morgan E.F., Unnikrisnan G.U., Hussein A.I. Bone Mechanical Properties in Healthy and Diseased States // Annu. Rev. Biomed. Eng. 2018. Vol. 20. P. 119-143. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-062117-121139.
19. Киченко А.А. Перестройка структуры губчатой костной ткани: математическое моделирование // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23, № 3. С. 336-358.
20. Mechanical properties of cancellous tissue in compression test and nanoindentation / G. Kokot, A. Makuch, K. Skalski, J. Bańczewski // Biomed. Mater. Eng. 2018. Vol. 29, No 4. P. 415-426. DOI: 10.3233/BME-180999.
21. Имитационное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния систем «кость-имплантат» при применении имплантатов из циркониевых сплавов / О.Н. Мищенко, А.В. Копчак, Н.Г. Кришук, И.А. Скиба, Д.М. Черногорский // Современная стоматология. 2017. № 2. С. 62-68.
22. Numerical simulation of the inelastic behavior of a structurally graded material / A.V. Orlov, V.S. Sufiarov, E.V. Borisov, I.A. Polozov, D.V. Masaylo, A.A. Popovich, M.O. Chukovenkova, A.V. Soklavok, D.S. Mihaluk // Letters on Materials. 2019. Vol. 9, No 1. P. 97-102. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-1-97-102.
23. 3D-printed cellular structures for bone biomimetic implants / S. Limmahakhun, A. Oloyede, K. Sithiseripratip, Y. Xiao, C. Yan // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 15. P. 93-101. DOI: 10.1016/j.ADDMA.2017.03.010.
24. A cadaver-based biomechanical model of acetabulum reaming for surgical virtual reality training simulators / L. Pelliccia, M. Lorenz, C.E. Heyde, M. Kaluschke, P. Klimant, S. Knopp, S. Schleifenbaum, C. Rotsch, R. Weller, M. Werner, G. Zachmann, D. Zajonz, N. Hammer // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, No 1. P. 14545. DOI: 10.1038/s41598-020-71499-5.

25. Zaytsev D., Gilev M.V., Izmodenova M.Yu. Mechanisms of Fracture of the Trabecular Bone Tissue of Periarticular Localization during a Depressed Fracture // Russian Metallurgy (Metally). 2020. No 4. P. 357-363. DOI: 10.1134/S0036029520040369.
26. Comparative characteristic of the methods of certification of deformed microstructure of trabecular bone tissue / M.V. Gilev, D.V. Zaitsev, M.Y. Izmodenova, D.V. Kiseleva, V.I. Silaev // Russian Journal of Biomechanics. 2019. Vol. 23, No 2. P. 202-208.
27. Возможности 3D-визуализации дефектов вертлужной впадины на этапе предоперационного планирования первичного и ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава / М.А. Садовой, В.В. Павлов, В.А. Базлов, Т.З. Мамуладзе, М.Ф. Ефименко, А.М. Аронов, А.А. Панченко // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2017. № 3. С. 37-42. DOI: 10.32414/0869-8678-2017-3-37-42.
28. Экспериментальное исследование механических свойств полилактида Н.А. Корж, М.С. Шидловский, В.Б. Макаров, А.А. Заховайко, О.В. Танькут, М.Ю. Карпинский, О.Д. Карпинская, Д.О. Чуприна // Травма. 2019. № 6. С. 5-11.
29. Автоматизированное проектирование и аддитивные технологии изготовления индивидуальных конструкций для ревизионного эндопротезирования тазобедренных суставов / Г.Д. Дмитриевич, Н.Г. Рыжов, С.М. Аль Ноумани, Р.М. Тихилов, А.В. Цыбин, П. Н. Вопиловский // SCM-2016: Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. Saint-Petersburg, 2016.
30. Segmental acetabular rim defects, bone loss, oversizing, and press fit cup in total hip arthroplasty evaluated with a probabilistic finite element analysis / F. Amirouche, G.F. Solitro, A. Walia, M. Gonzalez, A. Bobko // Int. Orthop. 2017. Vol. 41, No 8. P. 1527-1533. DOI: 10.1007/s00264-016-3369-y.
31. Позиционирование индивидуальных вертлужных компонентов при ревизиях тазобедренного сустава: действительно ли они подходят как «ключ к замку»? / А.Н. Коваленко, Р.М. Тихилов, С.С. Билык, И.И. Шубняков, М.А. Черкасов, А.О. Денисов // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2017. № 4. С. 31-37. DOI: 10.32414/0869-8678-2017-4-31-37.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 23.05.2022.

The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 23.05.2022.

Информация об авторах:

1. Мария Юрьевна Удинцева – izmodenova96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5500-4012>, SC Author ID: 57204826786;
2. Дмитрий Викторович Зайцев – доктор физико-математических наук, dmitry.zaytsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8045-5309>, SC Author ID: 36450015100;
3. Елена Александровна Волокитина – доктор медицинских наук, профессор, volokitina_elena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>, SC Author ID: 57194755505;
4. Ирина Петровна Антропова – доктор биологических наук, aip.hemilab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9957-2505>, SC Author ID: 18338795600;
5. Сергей Михайлович Кутепов – доктор медицинских наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-3069-8150>, SC Author ID: 18536460400.

Information about the authors:

1. Maria Yu. Udintseva – izmodenova96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5500-4012>, SC Author ID: 57204826786;
2. Dmitry V. Zaitsev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, dmitry.zaytsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8045-5309>, SC Author ID: 36450015100;
3. Elena A. Volokitina – Doctor of Medical Sciences, Professor, volokitina_elena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>, SC Author ID: 57194755505;
4. Irina P. Antropova – Doctor of Biological Sciences, aip.hemilab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9957-2505>, SC Author ID: 18338795600;
5. Sergey M. Kutepov – Doctor of Medical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3069-8150>, SC Author ID: 18536460400.

Конфликт интересов отсутствует.