

УДК 531/534: [57+61]

ГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУСТАВНОГО ХРЯЩА ГОЛОВКИ БЕДРА ЧЕЛОВЕКА

Я. Цванек*, А.А. Чайковский**

* Faculty of Physical Education, Rehabilitation Section, Rzeszow University, 35-001 Rzeszow, Piłsudskiego 30, Poland

Секция реабилитации факультета физического воспитания, Университет Жешова, Польша

** Institute of Mathematics, Faculty of Mathematics and Physics, Szczecin University, 70-451 Szczecin, Wielkopolska 15, e-mail: czajko@wmf.univ.szczecin.pl

Институт математики факультета математики и физики, Университет Щецина, Польша

Аннотация. Представлен анализ амплитудных параметров S_t , S_z и S_a поверхности 25 образцов суставного хряща головки бедра человека. На поверхности здорового суставного хряща выступают неровности, описываемые параметрами: S_t от 9,62 до 24,7 мкм ($\bar{x} = 16,0$; $\sigma = 4,59$), S_z от 8,38 до 18,5 мкм ($\bar{x} = 12,81$; $\sigma = 3,11$) и S_a от 0,78 до 2,24 мкм ($\bar{x} = 1,33$; $\sigma = 0,54$), где обозначено: $\bar{x}$ – среднее значение, σ – дисперсия. На поверхности пораженного артрозом суставного хряща выступают неровности, описываемые параметрами: S_t от 74,3 до 238,0 мкм ($\bar{x} = 160,35$; $\sigma = 45,39$), S_z от 38,9 до 178,0 мкм ($\bar{x} = 121,33$; $\sigma = 39,71$) и S_a от 11,2 до 30,7 мкм ($\bar{x} = 16,58$; $\sigma = 5,16$). Выступающие артротические изменения на поверхности суставного хряща оказывают влияние на работу тазобедренного сустава человека.

Ключевые слова: тазобедренный сустав, суставной хрящ, головка бедра, амплитудные параметры.

Введение

Поверхность нормального суставного хряща бедренной головки имеет перламутровый цвет и выглядит идеально гладкой. Максимальная высота хрящевых неровностей для нормального суставного хряща бедренной головки находится в диапазоне от нескольких мкм до величин более 20 мкм, а среднеарифметические отклонения находятся в пределах от 0,2 мкм до 5 мкм [2-4, 6-8, 10, 12, 16]. Эти величины высоты неровностей существенно выше по сравнению с неровностями в подшипниках машин и в искусственных тазобедренных суставах [8, 9, 13, 14, 15].

В литературе мало данных, которые говорили бы о том, до какой величины шероховатости поверхности суставной хрящ является нормальным, а какая величина шероховатости описывает хрящ, пораженный артрозом. По мнению Dawies, величина параметра S_a свыше 5 мкм означает износ суставного хряща [2]. Подобного взгляда придерживается Dumbleton [4]. В работе Adler и др. [11] показано, что при деформации и дегенеративных изменениях величина неровностей суставного хряща может достигать даже 150 мкм.

Очень часто состояние поверхностей описывается параметром S_a (в трехмерном случае) или R_a (в двумерном случае). В соответствии с литературными данными [9, 14,

15] и согласно мнению авторов этой статьи, это должно быть представлено не менее чем через 2 или 3 амплитудных параметра.

Цель настоящего исследования состоит в анализе выбранных параметров (S_t , S_z и S_a) для выяснения структуры геометрии поверхности как нормального, так и пораженного артрозом хряща головки бедра человека (т.е. деформации и дегенеративных изменений).

Материалы

Для анализа структуры геометрии поверхности авторами было подготовлено 25 образцов суставного хряща головки бедра, удаленного при операциях у пациентов в возрасте от 65 до 86 лет. В исследуемом материале 16 образцов были взяты у женщин.

Была исследована геометрическая структура поверхности 10 образцов нормального суставного хряща, удаленного при переломах шейки бедра (рис. 1). Также исследовалась структура поверхности 15 образцов суставного хряща бедренной головки с деформациями и дегенеративными изменениями. Эти головки были удалены при операциях полной артропластики тазобедренного сустава (рис. 2а, б).



Рис. 1. Правильная поверхность головки бедра у пациента 86 лет. Головка была удалена при переломе шейки бедра

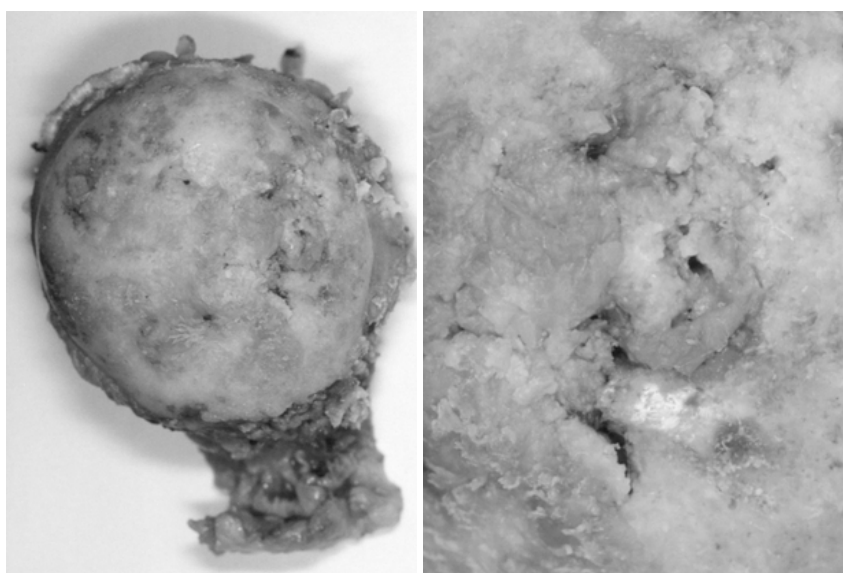


Рис. 2. Разрушенная поверхность суставного хряща бедренной головки: а – общий вид, б – фотография при увеличении

Методы

Измерения структуры геометрии поверхности проводились с помощью аппарата *Rank Taylor Hobson Talyskan 150*. Площадь сканируемой поверхности хряща была (1-2) мм × (1-2) мм при скорости сканирования 5,0 мм/с. Полученные данные записаны и обработаны с использованием программы *TALYMAP Expert 3.0* и *MS Excel 2003*. Результаты представлены в графическом виде.

Измерения структуры геометрии поверхности проводились несколько часов спустя после резекции бедренных головок. Принимая во внимание возможность повреждения дефектов хряща при измерении с помощью механического сенсора, головки бедра помещались на несколько секунд в жидкий азот (N) и затем промывались в 94% спирте. Эта процедура препятствует образованию налета замороженного слоя на поверхности суставного хряща бедренной головки.

Таблица описывает анализируемые амплитудные параметры для нормальной и артротической (т.е. пораженной остеоартрозом) поверхности суставного хряща бедренной головки.

Таблица

Виды анализируемых параметров поверхности

Параметр	Описание	Размерность
S_t	Полная высота шероховатостей (между наивысшей и самой низкой точками)	мкм
S_z	Средняя величина по 5 наивысшим и 5 самым низким точкам	мкм
S_a	Среднеарифметическая величина по суставному хрящу бедренной головки	мкм

Принимая во внимание возможности используемого аппарата, измерения для артротического хряща проводились в том случае, когда параметр S_t не превышал 250 мкм.

Для всех измеряемых параметров вычислялась среднеарифметическая величина $\bar{x}$ и среднеквадратическое отклонение σ . Результаты представлялись в виде гистограмм. Эти графики строились не только для нормального, но также и для пораженного артрозом суставного хряща бедренной головки. Среднеарифметические величины сравнивались попарно с использованием уровня значимости $p = 0,05$.

Результаты исследований

Сравнение параметров S_t и S_z для поверхностей 10 образцов нормального суставного хряща бедренной головки проиллюстрировано на рис. 3.

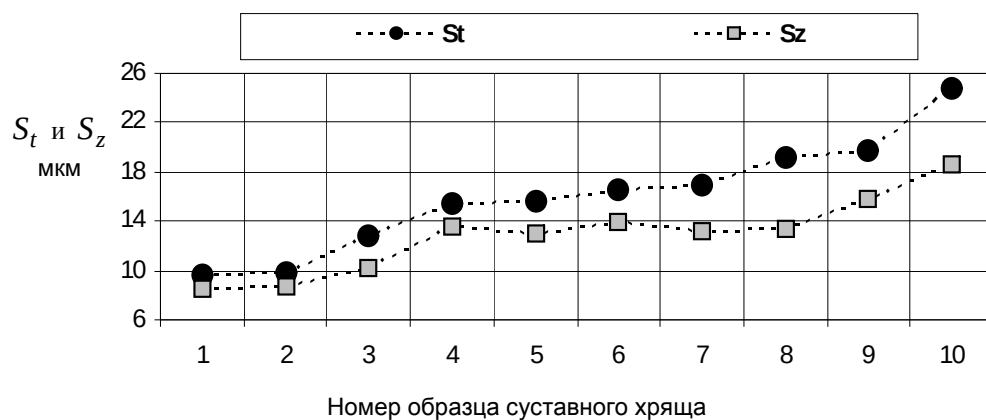


Рис. 3. Сравнение параметров S_t и S_z для поверхностей 10 образцов нормального суставного хряща бедренной головки

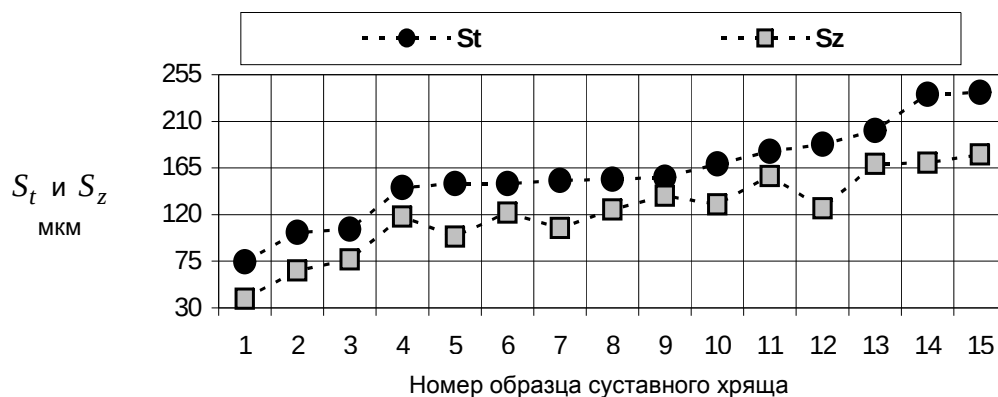


Рис. 4. Сравнение параметров S_t и S_z для поверхностей 15 образцов артротического суставного хряща бедренной головки

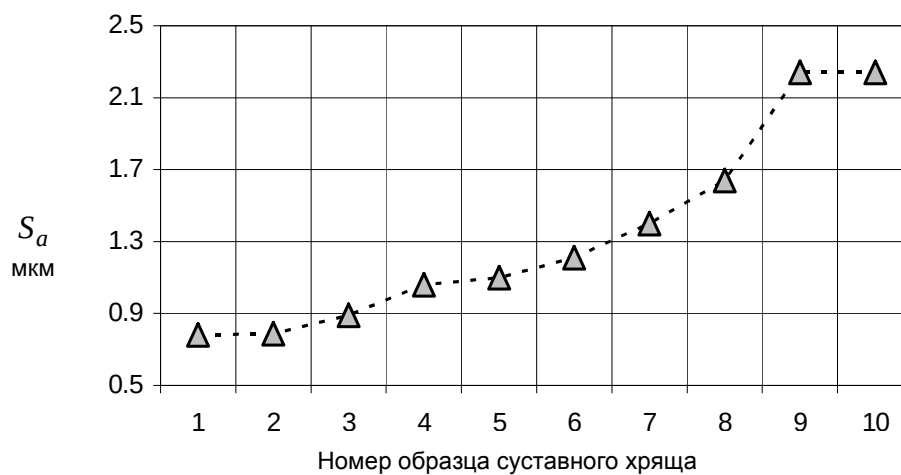


Рис. 5. Сравнение параметра S_a для поверхностей 10 образцов нормального суставного хряща бедренной головки



Рис. 6. Сравнение параметра S_a для поверхностей 15 образцов артротического суставного хряща бедренной головки

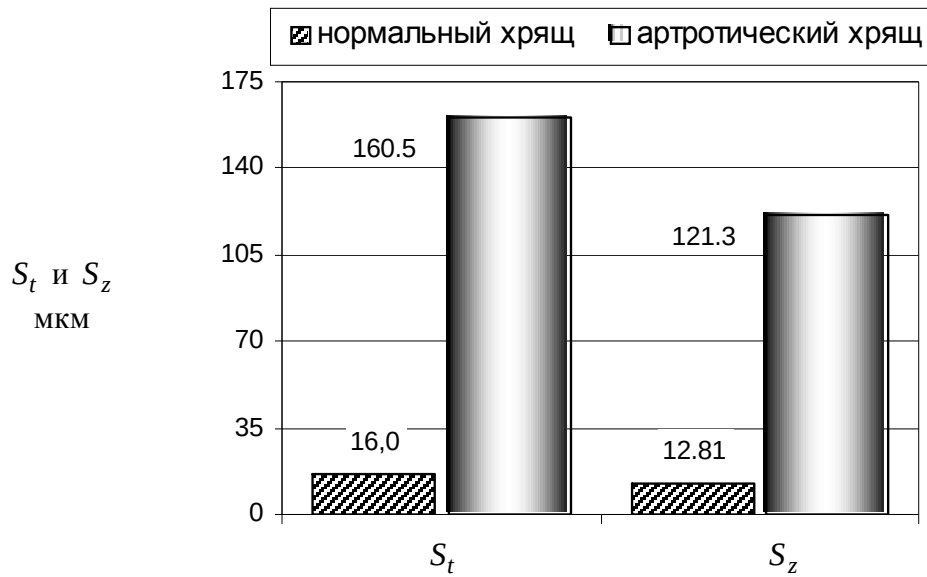


Рис. 7. Средние величины параметров S_t и S_z для поверхностей нормального и артротического суставного хряща бедренной головки

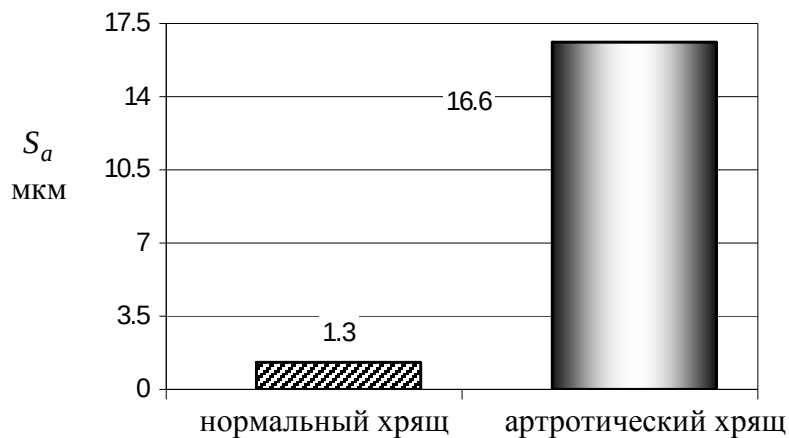


Рис. 8. Средние величины параметра S_a для поверхностей нормального и артротического суставного хряща бедренной головки

Величины параметра S_t и S_z для поверхности нормального суставного хряща находятся в интервале от 9,62 до 24,7 мкм ($\bar{x} = 16,0$; $\sigma = 4,59$), а параметра S_z – от 8,38 до 18,5 мкм ($\bar{x} = 12,81$; $\sigma = 3,11$).

Сравнение параметров S_t и S_z для поверхностей 15 образцов артротического суставного хряща бедренной головки показано на рис. 4.

Величины параметра S_t для поверхности артротического суставного хряща лежат в интервале от 74,3 до 238,0 мкм ($\bar{x} = 160,35$; $\sigma = 45,39$), а параметра S_z – от 38,9 до 178,0 мкм ($\bar{x} = 121,33$; $\sigma = 39,71$).

Сравнение параметра S_a для поверхностей 10 образцов нормального суставного хряща бедренной головки изображено на рис. 5.

Величины параметра S_a для поверхности нормального суставного хряща изменяются в интервале от 0,78 до 2,24 мкм ($\bar{x} = 1,33$; $\sigma = 0,55$).

Сравнение параметра S_a для поверхностей 15 образцов артротического суставного хряща бедренной головки показано на рис. 6.

Величины параметра S_a для поверхности артротического суставного хряща находятся в интервале от 11,2 до 30,7 мкм ($\bar{x} = 16,58$; $\sigma = 5,16$).

Средние величины параметров S_t и S_z для поверхностей нормального и артротического суставного хряща бедренной головки проиллюстрированы на рис. 7.

Показано, что образцы артротического суставного хряща бедренной головки характеризуются значительно большими величинами параметров S_t и S_z . В этом случае наблюдались деформация и дегенеративные изменения тазобедренного сустава.

Между средними арифметическими значениями этих параметров отмечено статистически существенное различие [$p < 0,001$].

Средние величины параметра S_a для поверхностей нормального и артротического суставного хряща бедренной головки изображены на рис. 8.

Видно, что в образцах артротического суставного хряща бедренной головки обнаружены значительно большие величины параметра S_a по сравнению с поверхностью нормального хряща. Между средними арифметическими значениями этого параметра отмечено статистически существенное различие [$p < 0,02$].

На рис. 9 и 10 представлены трехмерные изображения поверхностей нормального и артротического суставов. В скобках указаны параметры суставных поверхностей.

Обсуждение

С точки зрения механики тазобедренный сустав человека является самым идеальным шаровым шарниром, не имеющим эквивалентов в технике [2-6, 8, 10-14, 16-18]. Поверхности нормального сустава разделены пленкой синовиальной жидкости, толщина которой составляет от 60 до 200 мкм. В нормальном суставе не наблюдается никакого износа суставного хряща, и сила трения имеет очень малую величину [2-6, 8, 10, 12, 16-18].

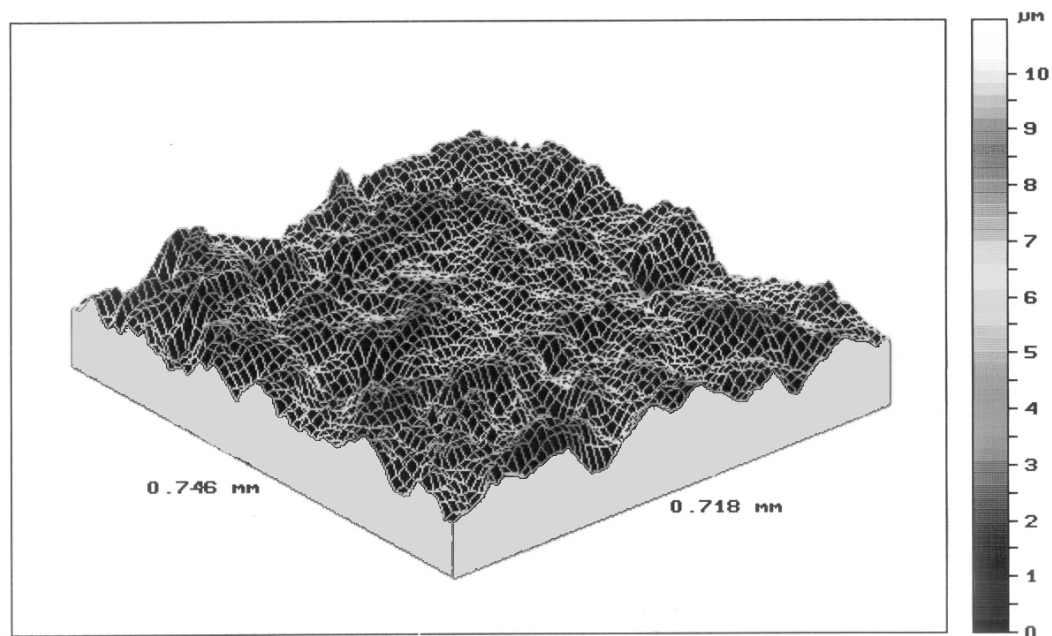


Рис. 9. Трехмерное изображение поверхности нормального суставного хряща бедренной головки ($S_t = 9,79$; $S_z = 6,62$; $S_a = 0,78$)

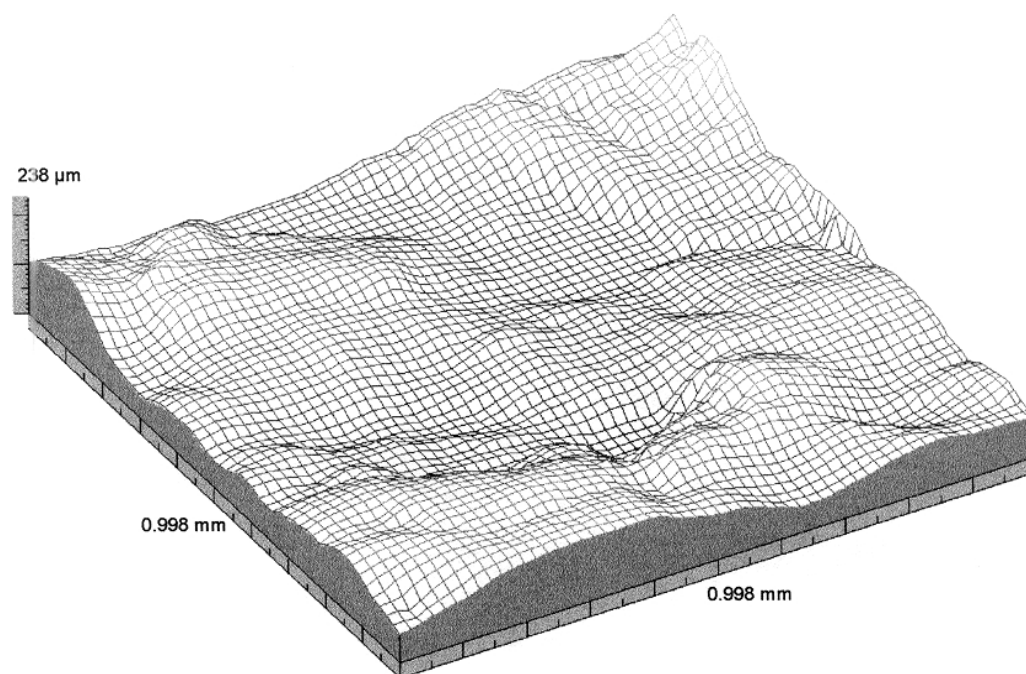


Рис. 10. Трехмерное изображение поверхности артротического суставного хряща бедренной головки ($S_t = 238,0$; $S_z = 178,0$; $S_a = 24,5$)

Гиалуроновая кислота придает синовиальной жидкости некоторые специфические свойства, которые не наблюдаются в натуральных или синтетических смазочных жидкостях [2-4, 6, 8, 10, 12, 18]. В случае болезни сустава синовиальная жидкость изменяет свои свойства (например, снижается ее вязкость), что вызывает уменьшение величины зазора между взаимодействующими поверхностями [5, 12, 18].

Испытания патологических областей суставного хряща бедренной головки свидетельствуют о том, что артроз тазобедренного сустава определяет некоторые коренные нежелательные изменения в геометрической структуре хрящевой поверхности. Этот факт подразумевает небольшое увеличение анализируемых параметров для артротического хряща (в десять и более раз) по сравнению с нормальным хрящом.

Наблюдаемые различия между среднеарифметическими значениями параметров S_t , S_z и S_a для нормального и артротического хряща бедренной головки являются статистически значительными [$p < 0,02 - 0,001$].

По мнению *Adler* [11], при неровностях суставного хряща, вследствие деформации и дегенеративных изменений в суставах человека, величина параметра S_t достигает даже 150 мкм. В работе *Ryniewicz* [12] представлены некоторые значения параметра S_a для поверхности нормального суставного хряща бедренной головки, которые находятся в интервале от 0,82 до 2,53 мкм. Авторы этой статьи получили подобные значения для параметров S_t и S_a .

В соответствии с данными литературы [2, 4] величины параметра S_a для нормального тазобедренного сустава не превышают 5 мкм. По мнению авторов, величины параметра S_a , по-видимому, должны быть несколько больше 5 мкм, потому что в этом случае аппроксимированные величины параметра S_t будут не меньше 45–50 мкм. Этот факт означает слишком высокие неровности для нормального хряща. Авторы статьи полагают, что была испытана некоторая модель поверхности суставного хряща с применением профильных измерительных приборов. Используемое в данной методике современное электронное оборудование в предыдущие годы не применялось.

Наблюдаемые неровности поверхности артротического хряща оказывают существенное влияние на нагрузку, силу трения, напряжения и на появление водоворотов в течении синовиальной жидкости в зазоре между взаимодействующими поверхностями [2-4, 8, 10, 13].

При нагружении тазобедренного сустава синовиальная жидкость проталкивается в трещины хрящевой поверхности, что вызывает их расклинивание и резкий рост. Как следствие, это приводит к дополнительным дефектам суставного хряща [2-4, 8, 10, 13, 16]. Данный факт означает невозможность естественного регресса деформации и дегенеративных изменений в тазобедренном суставе человека [1, 11, 17].

Выводы

Из приведенных выше рассуждений вытекают следующие выводы:

- На поверхности нормального суставного хряща встречаются неровности со следующими значениями амплитудных параметров: S_t от 9,62 до 24,7 мкм ($\bar{x} = 16,0$; $\sigma = 4,59$), S_z – от 8,38 до 18,5 мкм ($\bar{x} = 12,81$; $\sigma = 3,11$) и S_a – от 0,78 до 2,24 мкм ($\bar{x} = 1,33$; $\sigma = 0,54$).
- Артроз тазобедренного сустава человека определяет коренные нежелательные изменения в геометрической структуре хрящевой поверхности головки бедра. На

поверхности артротического суставного хряща встречаются неровности со следующими значениями амплитудных параметров: S_t от 74,3 до 238,0 мкм ($\bar{x} = 160,35$; $\sigma = 45,39$), S_z – от 38,9 до 178,0 мкм ($\bar{x} = 121,33$; $\sigma = 39,71$) и S_a – от 11,2 до 30,7 мкм ($\bar{x} = 16,58$; $\sigma = 5,16$).

- Неровности артротической поверхности суставного хряща головки бедра косвенно оказывают существенное влияние не только на нагрузку, напряжения и силу трения, но также и на появление водоворотов в течении синовиальной жидкости между взаимодействующими поверхностями.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору Жешовского университета Владимиру Любимову за обсуждение и помощь в подготовке сканируемых образцов поверхности суставного хряща бедренных головок.

Список литературы

1. *Buckwalter, J.A.* Degenerative joint disease / J.A. Buckwalter, J. Martin. New Jersey: Clinical Symposia. – Ciba; Geygi, 1995. – Vol. 2.
2. *Dowson, D.* Bio-tribology of natural and replacement synovial joints / D. Dowson, V.C. Mow, A. Ratcliffe, S.L.Y. Woo // *Biomechanics of Diarthrodial Joints*. – Vol. II. – New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag, 1990.
3. *Dowson, D.* Lubrication of joints / D. Dowson, A. Unsworth, A.F. Cooke, D. Gvozdanovic // *An Introduction to the Biomechanics of Joints and Joint Replacement*, edited by D. Dowson, V. Wright. – London: Medical Engineering Publications LTD, 1981.
4. *Dumbleton, J.H.* Tribology of natural and artificial joints, Tribology series, 3 / J.H. Dumbleton. – Amsterdam, Oxford, New York: edited by Elsevier Scientific Publish Company, 1981.
5. *Gierzyńska-Dolna, M.* Biotribology / M. Gierzyńska-Dolna. Częstochowa: edited by Technical University of Częstochowa, 2002.
6. *MacDonald, W.* Smarowanie stawu i naukowe podstawy alloplastyki stawowej / W. MacDonald, H. Mittelmeier // *Podstawy reumatologii*, edited by G.S. Panay. – Warszawa: Edited by PZWL, 1988.
7. *Małydk, E.* Patomorfologia stawów / E. Małydk, T. Wagner. – Warszawa: Edited by PZWL, 1991.
8. *Mow, V.C.* Tribology / V.C. Mow, R.J. Foster // *The adult hip*, edited by J.J. Callaghan, A.G. Rosenberg, H.E. Rubash. Lippincott-Raven Publishers, 1998.
9. *Oczkoś, K.E.* Struktura geometryczna powierzchni / K.E. Oczkoś, V. Liubimov. Rzeszów: Edited by Technical University of Rzeszow, 2003.
10. *Pytko, S.* Problemy tribologiczne stawów człowieka // S. Pytko, K. Wierzcholski, J. Pytko-Polończyk // *The 1st Scientific Seminar on Mechanics in Medicine*. Edited by Technical University of Rzeszow. – 1993. – № 1. – P. 33-43.
11. Quantitative assessment of cartilage surface roughness in osteoarthritis using high frequency ultrasound / R.S. Adler, D.K. Dedrick, T.J. Laing, E.H. Chiang, C.R. Meyer, C.R. Bland, J.M. Rubin // *Ultrasound Med. Biol.* – 1992. – Vol.18, № 1. – P. 51-57.
12. *Ryniewicz, A.M.* The analysis of lubrication mechanism of a human hip joint: Dissertations – Monographies / A.M. Ryniewicz. – Poland, Krakow: edited by University of Science and Technology (AGH). – 2002. – № 111.
13. Preliminary calculation of the effect of articular cartilage fissure geometry on the flow in the hip joint / J. Sęp, A. Kucaba-Piętal, J. Cwanek // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2004. – Vol.8, № 4. – P. 68-74.
14. Surface geometry of Weller endoprosthesis heads removed from the aseptic loosening / A.A. Czajkowski, J. Cwanek, W. Lubimow, K. Wierzcholski // Edited by Polish Science Academy (PAN), International Centre of Biocybernetics. Biomechanics – Customised Endoprosthesis – Design, Manufacture and Clinical Applications. – Warszawa, 2003. – Vol. 59. – P.105-117.

15. *Thomas, T. R.* Rough surfaces / T.R. Thomas. – London: edited by Imperial College Press, 1999.
16. Tribological aspects of human joints lubrication / J. Burcan, J. Cwanek, M. Gierzyńska-Dolna, M. Korzyński // *Tribologia*. – 1996. – № 4. – P. 321-337.
17. *Tylman, D.* Depletion of articular cartilage // D. Tylman, R. Aleksandrowicz // *Proceedings XIX International Congress of Polish Scientific Society Orthopaedic and Traumatology*, edited by PZWL. – Warszawa, 1972. P. 59-62.
18. *Wiercholski, K.* Kinds of friction in biotribology / K. Wiercholski, A.A. Czajkowski // *The 2nd Symposium on Orthopaedic and Prosthetic Engineering – IOP'99*. Technical University of Białystok and Medical Academy of Białystok. – Białystok, 1999. – P. 357-368.

GEOMETRY OF ARTICULAR CARTILAGE SURFACE OF HUMAN FEMORAL HEAD

J. Cwanek (Rzeszov, Poland), A. A. Czajkowski (Szczecin, Poland)

Analysis of some amplitude parameters S_t , S_z and S_a , which describe the surface geometric structure for 25 studied specimens of human femoral head articular cartilage, has been presented in this paper. On the surface of normal articular cartilage the irregularities occur where amplitude parameters have the following values: S_t is from 9.62 to 24.7 μm ($\bar{x} = 16.0$; $\sigma = 4.59$), S_z is from 8.38 to 18.5 μm ($\bar{x} = 12.81$; $\sigma = 3.11$), and S_a is from 0.78 to 2.24 μm ($\bar{x} = 1.33$; $\sigma = 0.54$). On the surfaces for arthrotic articular cartilages irregularities occur where amplitude parameters have the values: S_t is from 74.3 to 238.0 μm ($\bar{x} = 160.35$; $\sigma = 45.39$), S_z is from 9.0 to 178.0 μm ($\bar{x} = 121.33$; $\sigma = 39.71$), and S_a is from 11.2 to 30.7 μm ($\bar{x} = 16.58$; $\sigma = 5.16$). Here we use the following notations: $\bar{x}$ is the arithmetical mean, and σ is the standard deviation. The observed disease changes on the articular cartilage surfaces have the essential influence on work of the hip joint.

Key words: hip joint, articular cartilage, femoral head, amplitude parameters.

Получено 31 августа 2005