

## ОЦЕНКА РЕГЛАМЕНТИРУЕМЫХ ШАГА МИКРОЛУНОК И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ С ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ В ПАРЕ ТРЕНИЯ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА

Рассматривается нормирование шага лунок частично регулярного микрорельефа, создаваемого на головке сферического шарнира эндопротеза тазобедренного сустава с целью повышения его долговечности. Для определенного с помощью конечно-элементного моделирования диапазона изменения номинальных контактных давлений в шарнире получены количественные оценки классов шероховатости, до которых необходимо выполнять обработку поверхности головки для металл-металлической и металл-полимерной пар трения.

**Ключевые слова:** эндопротез, трение скольжения, частично регулярный микрорельеф, математическое моделирование

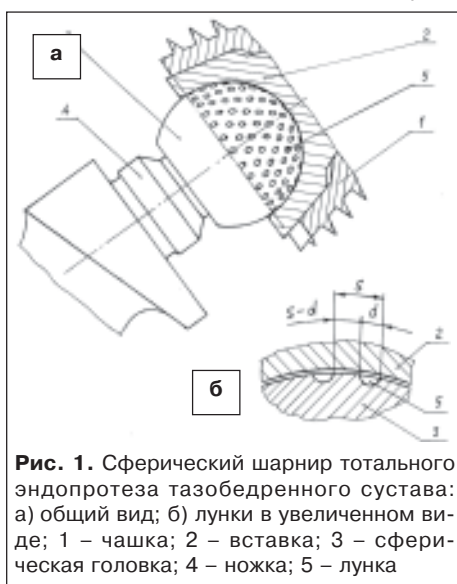
### Введение

Как показывает практика, основной причиной всех отказов эндопротезов тазобедренного сустава (ЭТБС) [1] является реакция иммунной системы человека на продукты износа, выделяющиеся в паре трения, что приводит к возникновению остеолиза и асептическому расшатыванию элементов эндопротеза, т.е. нарушению его фиксации в костных тканях и необходимости дальнейшего ревизионного протезирования. Исходя из этого, существуют различные методы для снижения интенсивности износа, один из которых – применение пар трения с твердыми материалами. Однако, согласно литературным источникам, до сих пор так и не был получен эндопротез с идеальной парой трения, поскольку указанные пары с твердыми материалами обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих их клиническое применение [2, 3]. При этом продукты износа, в ряде случаев токсического характера, выходят в окружающие ткани, распространяются по организму и накапливаются в жизненно важных органах, приводя иногда к тяжелым аллергическим реакциям.

Одним из путей снижения интенсивности износа и локализации его продуктов в паре трения является известный прием нанесения микрорелье-

фа на одну из поверхностей пары трения скольжения [4], например, головку эндопротеза. Наиболее распространенным является частично регулярный микрорельеф в виде микролунок [5], который позволяет улучшить трибологические свойства поверхностей, особенно в условиях обедненной смазки при, например, сухом и граничном трении. Это достигается благодаря тому, что раздельно расположенные закрытые от внешней области сустава лунки создают искусственные смазочные карманы. Наличие таких микрокарманов предотвращает адгезионное схватывание сопрягаемых деталей пары трения, способствует удалению внутрь их продуктов изнашивания из зоны контакта, подпитывает фрикционный контакт порцией смазочного материала по мере его срабатывания. Кроме того, под нагрузкой уменьшается объем лунок и, если они заполнены, то тем самым в них сжимается жидкость, которая воспринимает часть действующей нагрузки и уменьшает нагрузку непосредственно на сами контактирующие поверхности. Схема эндопротеза с частично регулярным микрорельефом на поверхности головки показана на рисунке 1. Здесь на сферической поверхности головки 3 в рабочей области сопрягаемых поверхностей на определенном расстоянии  $S$  друг от друга располагаются лунки 5, создающие регулярный рельеф; они выполнены со сферической формой профиля, имеющей на поверхности размер  $d$ . Данное техническое решение было положено в основу полученного патента Украины [6]. Согласно литературным источникам до сих пор нигде в мировой практике микрорельеф так и не был получен на сферической поверхности ввиду сложности процесса его нанесения.

Целью настоящей работы является нормирование шага лунок и протяженности шероховатого участка поверхности частично регулярного микро-



**Рис. 1.** Сферический шарнир тотального эндопротеза тазобедренного сустава: а) общий вид; б) лунки в увеличенном виде; 1 – чашка; 2 – вставка; 3 – сферическая головка; 4 – ножка; 5 – лунка

рельефа на сферической головке тотального ЭТБС в зависимости от номинального контактного давления и определение класса шероховатости, до которой необходимо обработать поверхность головки для металл-металлической и металл-полимерной пар трения. Задача рассматривается с позиции сухого или граничного трения, как наиболее экстремальных случаев смазки, и является весьма актуальной, поскольку в настоящее время разрабатывается технология получения микрорельефа на сферической поверхности головки эндопротеза.

## Материалы и методы

Известно, что при сухом и граничном трении в контакте между двумя твердыми телами присутствует тонкая пленка, состоящая из адсорбированного слоя, оксидов и химических соединений, разрушенного слоя и основного материала. С позиций молекулярно-механической теории сухого и граничного трения, разработанной И. В. Крагельским [7], и гипотезы «пленочного голодания», учитывая критерий минимума коэффициента трения, найдем соотношение  $S/(S-d)$  – среднего расстояния между лунками  $S$  и их средней протяженности  $S-d$  (рисунок 1).

Условие трения, при котором процесс износа пленок превалирует над их регенерацией, что может привести к контакту ювенильных (незащищенных) мест поверхностей, называется «пленочным голоданием» [8]. Чем длиннее путь трения, тем выше вероятность незащищенного контакта. Известно, что время формирования пленки составляет диапазон  $10^{-8} \dots 10^{-5}$  секунды и поэтому становится очевидным, что следует уменьшить путь скольжения для предотвращения обеднения слоя смазки, выполняя контактную поверхность в виде дискретной структуры.

Согласно упомянутой выше теории в случае упругого ненасыщенного контакта при постоянном объеме смазочного материала в шероховатом слое протяженностью  $S-d$  коэффициент трения скольжения является функцией только контурного давления  $p_c$  [7]. Волнистость является неотъемлемым атрибутом механической обработки поверхности и также зависит от контурного давления, которое в свою очередь зависит от номинального давления и типа волнистости (цилиндрическая или сферическая). Теперь, учитывая характеристики материалов пары трения, параметры волнистости, можно найти искомый параметр шероховатости  $\Delta$  (1) для критерия минимума коэффициента трения в зависимости от номинального контактного давления и отношения  $S/(S-d)$

$$\Delta = \left( \frac{1}{\left( \frac{S}{S-d} \right)^{1/v} \cdot \frac{1}{C} \cdot P_a^{0,4/2v+1}} \right)^{2v+1/2v}, \quad (1)$$

где коэффициент  $C$  получен для упрощения записи зависимости (1),  $v$  – параметр аппроксимации начальной части опорной кривой профиля шероховатости.

Аналогичное соотношение (2) получено для критерия отсутствия «пленочного голодания», когда контакт необходимо ограничить его переходом в пластическое состояние

$$\Delta \leq \left( \frac{1}{\left( \frac{S}{S-d} \right)^{2v+1/2v} \cdot \frac{P_a^{0,2}}{M}} \right)^{1/v}. \quad (2)$$

Согласно работе [8] существует оптимальное отношение  $\left( \frac{S}{S-d} \right)_{opt}$ , чтобы избежать «пленочное голодание». Более того, экспериментальные данные некоторых отечественных исследователей показали, что для большинства случаев

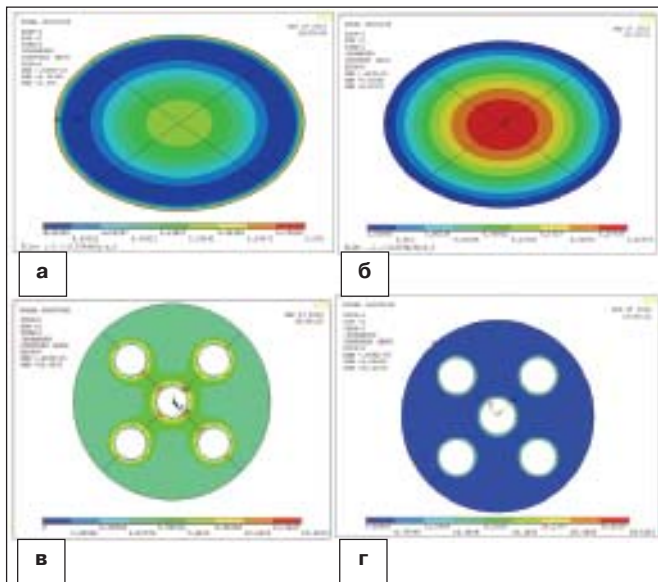
$$\left( \frac{S}{S-d} \right)_{opt} \approx 1,01 \dots 7,0. \quad (3)$$

## Результаты и их обсуждение

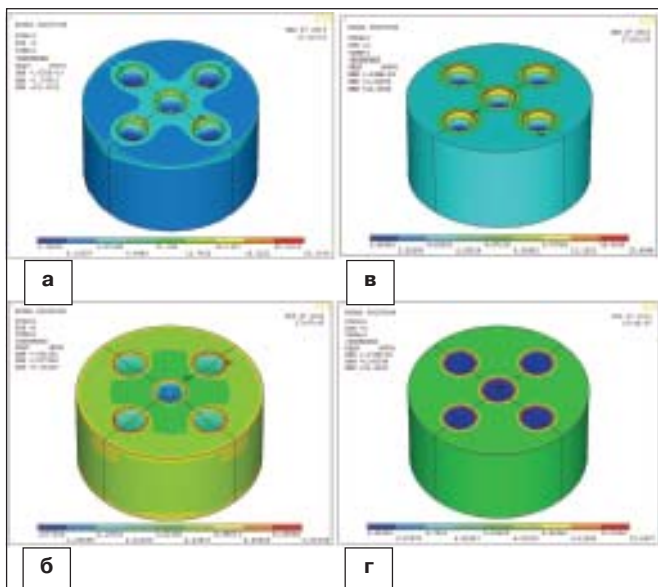
Определение номинальных контактных давлений для зависимостей (1) и (2) выполнено в программной среде ANSYS на головке тотального ЭТБС для пар трения металл (CoCrMo сплав)/сверхвысокого молекулярного веса полиэтилен (СМВПЭ – GUR 1020) и металл/металл (CoCrMo сплав) при гладких поверхностях и с микрорельефом для отношения  $h/d=0,50$  и  $0,15$ , где  $h$  – глубина лунки. С этой целью после решения в ANSYS с нагрузкой на сустав 2600 Н была получена полномасштабная выпуклая контактная поверхность без рельефа, показанная на рисунке 2 (пример для пары металл/СМВПЭ), и определены нормальные контактные давления. Вариация по величине отношения  $h/d$  была выполнена для оценки диапазона изменения величины нормального давления, так как согласно [9] это отношение рекомендуется назначать в диапазоне  $0,1 \dots 0,3$ .



Рис. 2. Полномасштабная контактная поверхность головки без рельефа



**Рис. 3.** Контактные поверхности. Пара металл/СВМПЭ: а) поверхность без рельефа; в) с рельефом  $d=100\mu\text{m}$ ,  $h/d=0,50$ ,  $S=200\mu\text{m}$ ,  $p_{\text{amax}}=22,8\text{МПа}$ . Пара металл/металл: б) поверхность без рельефа; г) с рельефом  $d=100\mu\text{m}$ ,  $h/d=0,15$ ,  $S=200\mu\text{m}$ ,  $p_{\text{amax}}=33,5\text{МПа}$ .



**Рис. 4.** Распределение напряжений по Мизесу. Пара металл/СВМПЭ: а)  $h/d=0,50$ ,  $\sigma_{\text{eqv max}}=23,3\text{ МПа}$ ; б)  $h/d=0,15$ ,  $\sigma_{\text{eqv max}}=11,1\text{ МПа}$ . Пара металл/металл: в)  $h/d=0,50$ ,  $\sigma_{\text{eqv max}}=11,3\text{ МПа}$ ; г)  $h/d=0,15$ ,  $\sigma_{\text{eqv max}}=11,6\text{ МПа}$ .

На рисунке 3 (а и б) можно видеть часть показанной на рисунке 2 полномасштабной контактной поверхности, смоделированной в микро масштабе, в ее наиболее нагруженной области. При этом нагрузка подобрана таким образом, чтобы получить ту же величину максимальных контактных давлений, что и на рисунке 2. А на рисунке 3 (в и г) показаны те же контактные поверхности с рельефом, где сетка перед решением задачи сгенерирована в модуле ANSYS ICEM CFD. На рисунке 4 представлены распределения напряжений по Мизесу  $\sigma_{\text{eqv max}}$  в зависимости от глубины лунок и сочетаний материалов пар трения.

Далее согласно формулам (1) и (2) для двух указанных сочетаний материалов и двух видов волнистости определен комплексный параметр шероховатости  $\Delta$ , по которому из рекомендаций [7] получен класс шероховатости. Диаграмма примера такого вычисления в зависимости от отношения  $S/(S-d)$  и номинального контактного давления показана на рисунке 5, а результаты сведены в таблицу 1 в диапазоне отношения согласно условию  $(S/S-d)_{\text{opt}}$  (3).

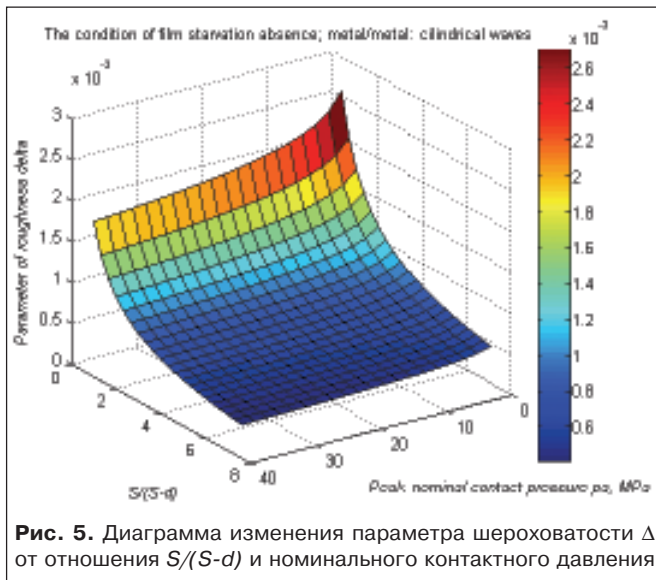
Анализ выполненных расчетов привел к следующим результатам. В диапазоне номинальных контактных давлений 2...40 МПа и более условие отсутствия «пленочного голодания» является определяющим критерием, который дает оптимальное отношение  $S/(S-d) = 1,01...7,0$ .

Коэффициент трения для этого диапазона указанного отношения достигает своего минимума при относительно грубой обработке поверхности и поэтому не является определяющим критерием. До более высокого класса шероховатости (таблица 1) необходимо обрабатывать поверхность головки для пары металл/металл по сравнению с парой металл/СВМПЭ, в случае сферической волнистости по сравнению с цилиндрической, при увеличении величины отношения  $S/(S-d)$  и номинального контактного давления (рисунок 5), но контактное давление оказывает слабое влияние. С ростом  $S/(S-d)$  класс шероховатости возрастает. Также получен интересный результат, который показал, что значительное изменение начальных параметров при определении отношения  $S/(S-d)$  приводит к максимальному изменению класса

Таблица 1

Результаты расчетов необходимых классов шероховатости для двух критериев

Пара трения	Параметры	Минимум коэффициента трения		Отсутствие пленочное голодания	
		Тип волнистости		Тип волнистости	
		цилиндрическая	сферическая	цилиндрическая	сферическая
Металл/СВМПЭ	$\Delta$	0,1...0,4	0,04...0,24	0,04...0,24	0,04...0,15
	Класс шероховатости	7	8	8	8
Металл/металл	$\Delta$	0,004...0,02	0,002...0,012	0,0006...0,0026	0,0004...0,0015
	Класс шероховатости	8	8	10...9	10...9



шероховатости поверхности не более, чем на одну единицу.

При изменении отношения  $h/d$  с 0,5 до 0,15 для пары трения металл/СВМПЭ номинальное давление на поверхности головки снижается примерно на 15%, а напряжения по Мизесу – в 3,3 раза. Для пары металл/металл номинальное давление при этом возрастает примерно в 2 раза, а напряжения по Мизесу снижаются на 19%. Это указывает на повышение несущей способности обоих видов пар трения при уменьшении отношения  $h/d$  в большей или меньшей степени.

## Заключение

Полученные результаты позволяют обеспечить технически обоснованный подход при проектировании сферического шарнира эндопротеза тазобедренного сустава с частично регулярным поверхностным рельефом, а также других суставов, в состав которых входит сферический шарнир. Кроме того, это позволяет сформировать исходные данные при постановке и решении дальнейшей задачи по определению интенсивности износа в проектируемом шарнире.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию плотности рельефа и глубины лунок с трибологической точки зрения для увеличения ресурса эндопротеза.

## Литература

1. Тянькут О.В. Обґрунтування ендопротезування кульшового суглоба з використанням монокристалічного корунду в шарнірі ендопротеза: дис. канд. мед. наук: 14.01.21: захищена 18.11.10 / Тянькут Олексій Володимирович. – Харків, 2010. – 175 с.
2. Вырва О.Е. Современные пары трения в эндопротезировании тазобедренного и коленного суставов / О.Е. Вырва, О.А. Подгайская // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2013. – С. 132–133.
3. Эндопротезы суставов человека: материалы и

технологии: монография / Под ред. Н.В. Новикова, О.А. Розенберга, Й. Гавлика. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 528 с.

4. Literature review: effect of surface texturing on friction and wear for sliding surfaces [Электронный ресурс]. – Электрон. данные (92100 bytes). – Режим доступа: [http://web.mit.edu/rktakata/www/dimples\\_lit\\_review.pdf](http://web.mit.edu/rktakata/www/dimples_lit_review.pdf) Monday, 12 August 2013 17:21:22.
5. ГОСТ 24773–1981. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. – Введ. 1992 – 07 – 01. – М.: Госкомитет СССР по стандартам. – 14 с.
6. Пат. 60041 А Україна, МКП <sup>7</sup> А 61 F 2/32. Сферичний шарнір ендопротеза кульшового суглоба/ В.Л.Харчін, В.І.Пахалюк, М.І.Калінін, В.А.Філіпенко.- №2003010404; Заявл. 16.01.03; Опубл. 15.09.03. Булл. №9//Промислова власність. – 2003.
7. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Крагельский И.В. Фрикционные автоколебания / И.В. Крагельский, Н.В. Гитис. – М.: Наука, 1987. – 183 с.
9. Enrico Gualtieri. Improving tribological properties of steels by surface texturing and coating [Электронный ресурс]. – Электрон. данные (8330000 bytes). – Режим доступа: <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.nano-phdschool.unimore.it%2Fsite%2Fhome%2Fphd-students%2Fdocumento102017684.html&ei=8IBJUoCDN-T24QSGlYDYDA&usq=AFQjCNHEmETj55Bij44kItq8tZdncUqIQ&sig2=UeEnPb6mQ7FMuE5qa&utm=bnv53217764.dbcGE> Friday, 08 February 2013 19:38:10.

**В.І. Пахалюк, М.І. Калінін, Є.М. Іванов, Я.М. Гайнулліна**

### Оцінка регламентованих кроку мікролунок і шорсткості поверхні голівки з частково регулярним микрорельєфом в парі тертя тотального ендопротеза кульшового суглоба

Розглядається нормування кроку лунок частково регулярного микрорельєфу, створюваного на голівці сферичного шарніра ендопротеза кульшового суглоба з метою підвищення його довговічності. Для визначеного за допомогою кінцево-елементного моделювання діапазону зміни номінальних контактних тисків у шарнірі отримані кількісні оцінки класів шорсткості, до яких необхідно виконувати обробку поверхні голівки для метал-металевої і метал-полімерної пар тертя.

**Ключові слова:** ендопротез, тертя ковзання, частково регулярний микрорельєф, математичне моделювання

**V.I. Pakhaliuk, M.I. Kalinin, Y.M. Ivanov, Ya.M. Gaynullina**

### Evaluation of the needed dimples spacing and roughness of a ball head surface with partially regular surface texture in total hip joint prosthesis

Regulation of the dimples spacing of partially regular surface texture created on a ball head of total hip joint prosthesis to increase its durability is considered. For obtained, with using finite-element modeling, the range of nominal contact pressure in the joint, the quantitative estimates of roughness classes to which it is necessary to process a ball head surface for metal-on-metal and metal-on-polymer friction pairs are defined.

**Keywords:** prosthesis, sliding friction, partially regular surface texture, mathematical modeling.