

УДК 538.971

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО В ПЛАЗМЕ ВЧ-РАЗРЯДА

© 2020 г. Ю. П. Шаркеев^{a, b}, К. С. Попова^{a, *}, К. А. Просолов^{a, b, **},
Е. Freimanis^c, Yu. Dekhtyar^c, И. А. Хлусов^{b, d}

^aИнститут физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055 Россия

^bНациональный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050 Россия

^cInstitute of Biomedical Engineering and Nanotechnologies, Riga Technical University, Riga, LV-1658 Latvia

^dСибирский государственный медицинский университет, Томск, 634050 Россия

*E-mail: kseniya@ispms.tsc.ru

**E-mail: konstprosolv@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.

После доработки 17.02.2019 г.

Принята к публикации 17.02.2019 г.

Выполнены исследования взаимосвязи электрического потенциала поверхности электретных кальций-фосфатных покрытий, сформированных методом ВЧ-магнетронного распыления, и топографии поверхности покрытия. Определено, что распределение электрического потенциала по поверхности покрытия имеет неравномерный характер: его максимальная величина локализована вблизи структурных элементов (вершин) поверхности покрытия с более высоким значением остроты пика. Точки поверхности покрытия с максимальным потенциалом в диапазоне 670–900 мВ соответствуют рельефу с локализацией точек с высотой 77–326 нм. Более высокие значения работы выхода электронов с поверхности покрытия, по сравнению с работой выхода с поверхности без покрытия (титана) соответствуют эффекту усиления эффекта адгезии остеообластов и остеокластов к поверхности кальций-фосфатных покрытий.

Ключевые слова: ВЧ-магнетронное покрытие, электрический потенциал, поверхностная топография, острота пика, фотоэлектронная спектроскопия, атомно-силовая микроскопия, зонд Кельвина.

DOI: 10.31857/S102809602001015X

ВВЕДЕНИЕ

Создание биосовместимых материалов для долговременного восстановления и замены костных тканей человека является одной из приоритетных задач медицинского материаловедения. Наиболее распространенными и широко используемыми материалами для этой цели до настоящего времени считались металлические материалы в силу их высоких прочностных характеристик и относительно низкой стоимости. Для придания биосовместимости, химико-биологического подобия костной ткани и управления свойствами имплантатов выполняют модификацию их поверхности путем формирования покрытий, в том числе на основе фосфатов кальция [1]. Существует ряд методов, позволяющих получать такие покрытия: микродуговое или плазменно-электролитическое окисление, лазерная абляция, золь-гель метод, метод ВЧ-магнетронного распы-

ления и др. [2]. Последний отличается от остальных методов модификации поверхности возможностью управлять толщиной покрытия в нанометровом диапазоне и создавать заданную периодическую структуру, например, путем использования шаблонов для напыления [3], а также высокой степенью адгезии покрытия к подложке.

В исследованиях, проведенных ранее, установлено важное и необходимое требование к внутрикостным имплантатам: поверхность имплантата должна быть шероховатой и/или микропористой [4], прежде всего, для усиления адгезионных свойств покрытия к подложке [5, 6]. Оптимальные характеристики поверхности для улучшения биологических процессов все еще обсуждаются. Однако определено, что шероховатость поверхности однозначно улучшает интеграцию имплантата с костной тканью и предотвращает его отторжение [7]. В работе [8] показано,

что оптимальная шероховатость поверхности имплантата, обеспечивающая успешный рост костной ткани на такой поверхности, составляет по R_a 2.5–4.0 мкм.

Еще одним важным свойством биопокрытий в составе имплантатов, введенных в скелетно-мышечную систему, является их электрическая совместимость на всех уровнях биологической организации живых систем (молекулярном, клеточном, органно-тканевом) [9]. Как было показано экспериментально в работах [10–15], электрически поляризованный гидроксипатит усиливает эффект роста костной ткани на покрытии, что является важным эффектом с точки зрения контроля жизнедеятельности электровозбудимых и невозбудимых клеток.

В настоящее время существует небольшое число работ, связанных с электрической поляризацией покрытий на основе гидроксипатита (ГА) [16–19]. Более того, по результатам проведенного литературного обзора установлено, что эффект поляризации тонких ВЧ-магнетронных покрытий на основе гидроксипатита и его зависимость от морфологии поверхности практически не изучены.

Математические представления по распределению электрического заряда по поверхности частиц гидроксипатита развиты в работах В.С. Быстрова [20, 21]. Было показано, что плотность положительного поверхностного электрического заряда наночастиц ГА возрастает с уменьшением их размера. Таким образом, следует ожидать, что структурные элементы поверхности, имеющие большую остроту, обеспечат значительный вклад в общий положительный заряд покрытий. Таким образом, изменяя топографию металлической подложки под покрытием, а тем самым и самого покрытия, можно получить необходимое распределение электрического заряда и электрического потенциала по поверхности, тем не менее, применения такого подхода в литературе нами обнаружено не было.

Целью настоящей работы являлось установление взаимосвязи поверхностного электрического потенциала и шероховатости поверхности тонкого электретного кальций-фосфатного покрытия, сформированного на подложках титана методом ВЧ-магнетронного распыления мишени из гидроксипатита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы титана марки ВТ1-0 в форме дисков диаметром 10 мм были использованы в качестве подложек. Обработка поверхности титановых

подложек производилась с помощью шлифовальной бумаги марок P150, P320, P400, P600, P1000, P1500 и P2000. Полирование проводилось с использованием алмазных паст, абразивная способность которых составляла 28–20, 20–18 и 14–10 мкм. Перед нанесением покрытий проводилась процедура очистки поверхности подложек от загрязнений путем обезжиривания поверхности образцов в ультразвуковой ванне с использованием омыляющих составов и органических растворителей с последующей сушкой на воздухе.

Нанесение кальций-фосфатных покрытий проводилось методом ВЧ-магнетронного распыления мишени, изготовленной из порошка ГА, на установке “Яхонт-2М” с частотой источника 13.56 МГц [22]. Использован ГА, изготовленный методом гетерофазного синтеза с механохимической активацией (ЗАО “Бизнеслинк”, г. Москва). Формирование мишени в виде дисков диаметром 110–120 мм и толщиной 3–6 мм производили одноосным прессованием пресс-порошков при комнатной температуре в стальной пресс-форме на гидравлическом прессе МИС-6000.4К (г. Армавир, Россия). Пресс-порошки готовились с использованием водного раствора поливинилового спирта марки ПВС-16/1 высшего сорта производства ООО “Хелат” (г. Москва, Россия), обжиг заготовок после прессования проводили в камерной электропечи с программным управлением ИТМ 12.1200 в воздушной атмосфере. Максимальная температура обжига составляла 1000°C, временной цикл нагрева до максимальной температуры составил 4 часа, а охлаждения – более 30 часов.

В работе использовалась вакуумная установка с магнетронной напылительной системой и источником ионной очистки. Конструкция установки обеспечивает ионную очистку поверхности образцов и осаждение покрытий из неподвижного магнетрона внутри рабочей камеры. Перед распылением мишени поверхность подложки, находящаяся в вакуумной камере, была активирована с помощью источника ионов свободного замкнутого дрейфа электронов при энергии 1.5–2.9 эВ, токе 10–30 мА и давлении в камере 1 Па. Время ионной активации составляло 15 минут.

Напыление проводили, используя в качестве рабочего газа аргон, при этом давление рабочего газа составляло 0.2 Па, время напыления – 2 часа, мощность ВЧ-разряда – 250 Вт. Толщина полученных кальций-фосфатных покрытий не превышала 650 нм. Измерение толщины покрытий было выполнено на образцах-свидетелях из полированного монокристаллического кремния методом спектральной эллипсометрии с использованием комплекса ЭЛЛИПС-1891 САГ (Новоси-

бирск, Россия). Шероховатость поверхности металлических образцов до нанесения покрытия и поверхности покрытий после их нанесения была измерена на профилометре “Профилометр-296” по R_a (ГОСТ 2789-73).

Для получения изображений поверхности образцов титана после обработки использовали растровый электронный микроскоп Philips SEM 515 с микроанализатором EDAX ECON IV (США).

Исследование топографии поверхности покрытий на образцах проводили с использованием измерительного комплекса ИНТЕГРА (НТ-МДИ, Россия). Метод зонда Кельвина в атомно-силовом микроскопе (АСМ) был использован для измерения контактной разности потенциалов между зондом и образцом, а также характеристики связи электрического потенциала поверхности и геометрии поверхности подложки. Метод зонда Кельвина в АСМ основывается на двухпроходной методике. При первом проходе определяется рельеф поверхности образца с использованием прерывисто-контактного метода (колебания кантилевера возбуждаются механически). При втором проходе этот рельеф отслеживается при прохождении над образцом на некоторой высоте для определения поверхностного электрического потенциала. Если на зонд не подается постоянное смещение, то это распределение представляет собой распределение контактной разности потенциалов [23].

Для определения значения работы выхода и проведения корреляции с зарядовым состоянием поверхности металлических образцов и образцов с покрытием использовался метод фотоэлектронной спектроскопии. Оборудование было разработано и изготовлено в лаборатории Института биомедицинской инженерии и нанотехнологий Рижского технического университета (Латвия). Установка фотоэлектронной спектроскопии включает в себя вакуумную камеру с подложкодержателем и окном, через которое пропускается свет от фотостимулятора, вакуумные герметичные соединения, пригодные для термостимулирования, и систему регистрации испускаемых электронов (детектор электронов). Механический роторный насос и диффузионный насос позволяют достигать давления в камере порядка 10^{-4} Па.

Подложкодержатель ориентирован под углом 45° к испускаемому пучку света. Фотостимуляция образцов была осуществлена при помощи дейтериевой лампы мощностью 30 Вт, излучающей непрерывный спектр света с энергиями фотонов в диапазоне от 3.1 до 6.2 эВ ($\pm 2\%$). Световой пучок фокусировался кварцевой линзой на дифракционный монохроматор для выбора необходимой

длины волны, а затем с помощью кварцевой линзы фокусировался на образце, при этом диаметр пятна был не более 1 мм. Вторичный электронный умножитель использовался как система регистрации электронной эмиссии с поверхности образца. Темновой ток от электронного детектора составляет 0.1 импульса в секунду, благодаря чему детектор способен регистрировать до 105 импульсов в секунду. Диафрагма электронного детектора (диаметр 8 мм) достаточна для идентификации значительного числа электронов из образца, причем исключает посторонние электроны. Ток испускаемых частиц измерялся вторичным электронным умножителем, работающим в режиме одноэлектронного счета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренная шероховатость по R_a составила 0.7 мкм на поверхности подложки и 0.6 мкм на поверхности покрытия. Известно, что покрытия, сформированные методом ВЧ-магнетронного распыления, в силу их малой толщины повторяют поверхность подложки и заполняют также несплошности в виде поверхностных пор, впадин и пр., что в некоторых случаях может приводить к незначительному увеличению значения шероховатости из-за небольшой толщины покрытия [24]. Подробное исследование фазового состава и морфологии поверхности кальций-фосфатных покрытий, сформированных путем распыления мишени из ГА, проведено нами ранее в работе [25]. Показано, что образуется покрытие, представленное преимущественно фазой $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_{2(\text{hex})}$, морфология покрытия формируется в виде полусфер. Покрытия являются сплошными и однородными, макродефекты на поверхности подложек, не имеющих покрытия, обнаружены не были. Покрытие является электретным, так как несет электрический заряд, сохраняющийся длительное время: зарядовое состояние сохраняется, по крайней мере, до шести месяцев. Измерение потенциала для больших времен не проводилось.

На рис. 1 приведены фрагмент АСМ-изображения поверхности покрытия, полученного с области сканирования 25×25 мкм (рис. 1а), и профиль распределения электрического потенциала (рис. 1б) вдоль линии, полученный с использованием метода зонда Кельвина. Для более наглядного представления результата был выбран фрагмент изображения, содержащий в центре области сканирования структурный элемент, высота которого значительно превышает средний уровень высот рядом расположенных элементов.

Из рис. 1а видно, что электрический потенциал распределен по поверхности неравномерно,

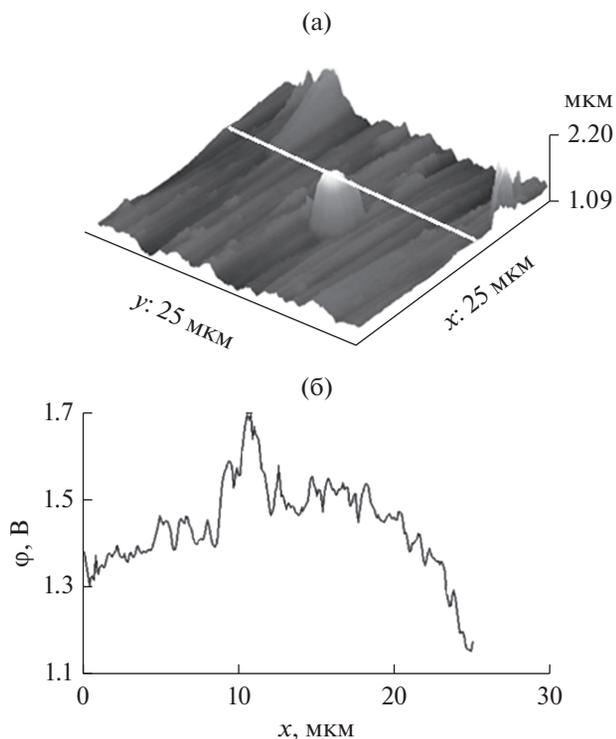


Рис. 1. Изображение ВЧ-магнетронного кальций-фосфатного покрытия на титановой подложке (а), белой линией показан путь сканирования; профиль распределение электрического потенциала по поверхности сканирования (б).

его максимальная величина локализована в области вблизи островершинного структурного элемента. Максимальное значение потенциала в области данного элемента соответствует 1.7 В, что превышает среднее значение потенциала вдоль линии сканирования потенциала, равное 1.25 В. Также из профиля распределения видно, что уровень электрического потенциала коррелирует с шероховатостью поверхности.

На рис. 2 представлены распределения электрического потенциала, полученные с помощью АСМ, при этом использовали метод зонда Кельвина по двухпроходной методике, область сканирования при этом составляла 50×50 мкм. Средняя шероховатость, определенная в ходе сканирования в этой зоне равна $R_a = 0.5$ мкм. На рис. 2 г представлены результаты измерения контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ (КРП) по линии сканирования. Измерения показали, что распределение электрического заряда по поверхности коррелирует с топографией покрытия, особенно это хорошо видно при резких переходах от “вершин” к “впадинам”. Более того, на рис. 2г и 2д отчетливо виден структурный элемент высотой 1.5 мкм, который имеет высокое значение КРП, равное 1.2 В.

При выполнении исследования были проведены многократные сканирования зондом Кельви-

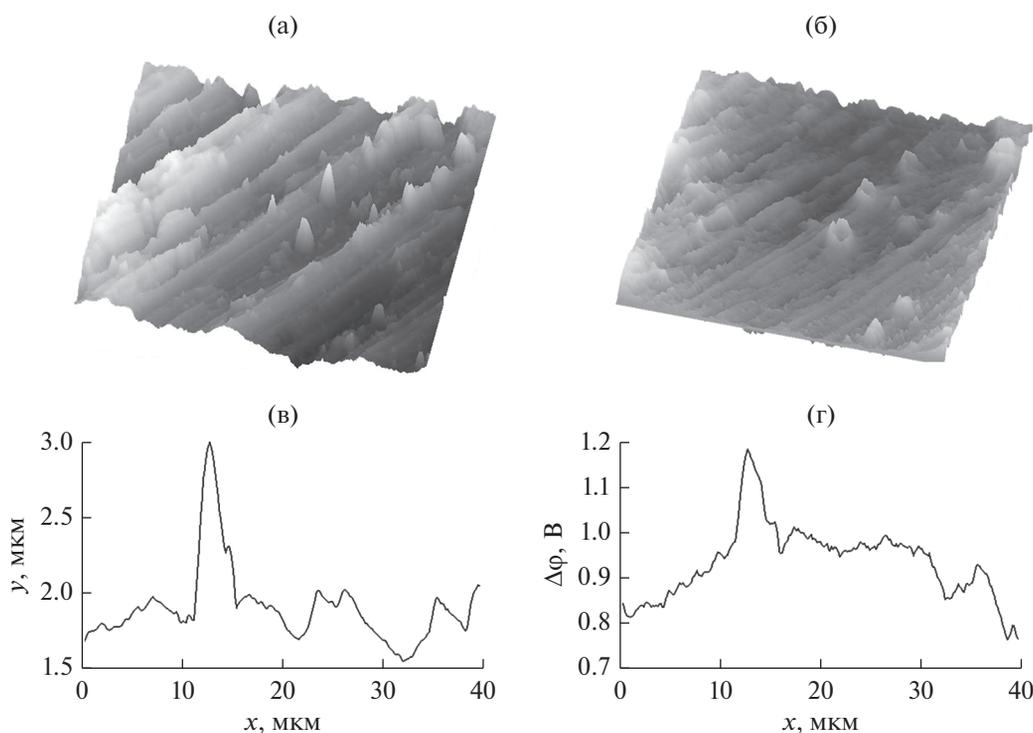


Рис. 2. Топография (а) и распределения контактной разности потенциалов (КРП) по поверхности (б), а также профиля топографии (в) и КРП ($\Delta\phi$, В) покрытия (г), сформированного на титане методом ВЧ-магнетронного распыления.

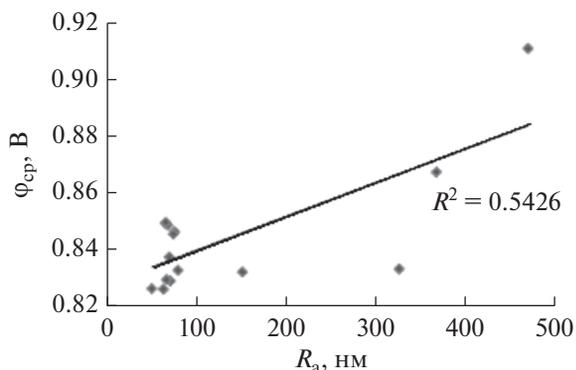


Рис. 3. Зависимость среднего электрического потенциала $\phi_{ср}$ от параметра шероховатости поверхности R_a покрытия.

на по поверхности образцов с покрытием для определения зависимости среднего значения электрического потенциала от значений шероховатости поверхности по R_a . Обнаружена значимая линейная корреляция между шероховатостью поверхности подложки с покрытием и средним значениями электрического потенциала (коэффициент корреляции Пирсона [26] $R = 0.74$ при критическом значении параметра, равном 0.54 (рис. 3). Величина среднего электрического потенциала для поверхности с большей средней шероховатостью выше. Так, поверхности со средней шероховатостью $R_a = 67.5$ нм имеют средний электрический потенциал $\phi_{ср} = 0.850 \pm 0.002$ В, а поверхность со средней шероховатостью $R_a = 196.6$ нм имеет среднюю электрическую потенциал $\phi_{ср} = 0.94 \pm 0.012$ В.

Известно, что кальций-фосфатные покрытия применяются в медицине для усиления остеоинтеграции [1, 2]. Причиной улучшенного сцепления между покрытием и костью, является высокая адгезия остеобластов и остеокластов к поверхности фосфата кальция. Повышенную адгезию обуславливает целый комплекс причин, в том числе электрический заряд поверхности и ее электрический потенциал. На рис. 4 представлены спектры тока фотоэлектронной эмиссии в зависимости от энергии фотонов с металлической поверхности образца титана без покрытия и с покрытием, сформированным методом ВЧ-магнетронного распыления на титановой подложке. По результатам измерения спектров была оценена работа выхода электрона, характеризующая плотность поверхностного заряда.

В отличие от метода АСМ с зондом Кельвина, этот тип измерения предоставляет данные о величине работы выхода в миллиметровом масштабе, так как диаметр пятна возбуждения электронов с

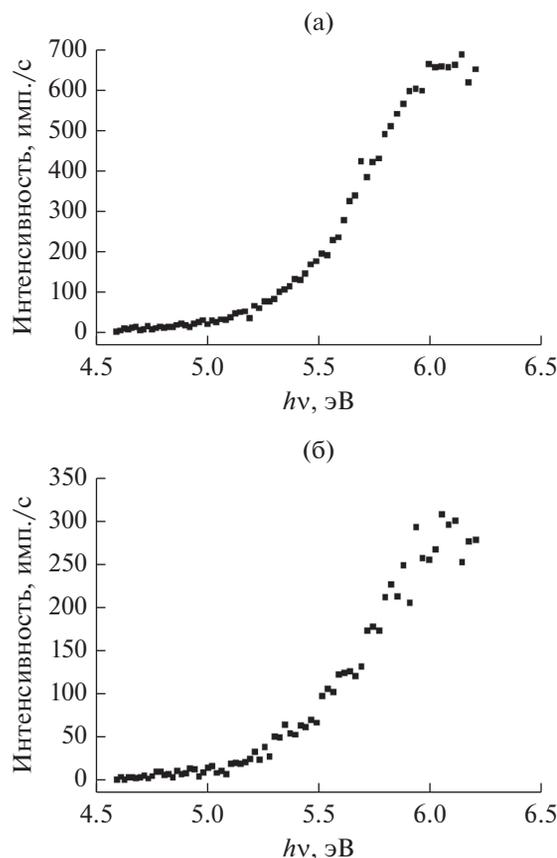


Рис. 4. Интенсивность выхода электронов от энергии излучения с поверхности титана (а) и кальцийфосфатного покрытия, сформированного на титане ВЧ-магнетронным распылением (б).

поверхности образца составляет 2 мм. Работа выхода электронов с поверхности титана по результатам измерений равна 4.65 ± 0.05 эВ, что согласуется с табличными данными по работе выхода с поверхности TiO_2 [27]. Согласно расчетам, значение работы выхода с поверхности покрытия составляет 5.02 ± 0.05 эВ, что выше значений, полученных на титане. В ходе измерений корреляции между шероховатостью и значением работы выхода электрона с поверхности покрытия выявлено не было, во всех случаях работа выхода с ГА была равна 5.02 ± 0.05 эВ, что соответствует данным, опубликованным другими научными группами [21, 28].

Для оценки связи остроты пиков поверхности покрытия с поверхностным электрическим потенциалом была выполнена аппроксимация параболической функцией $f(x) = ax^2 + bx + c$, где коэффициент a характеризует остроту пика. На рис. 5 показан пример использования данного подхода для описания одного из типичных профилей. Для расчета коэффициента a были использованы

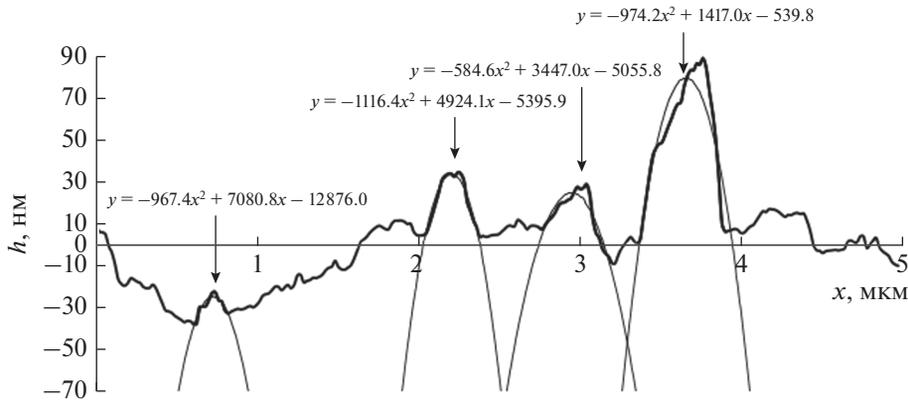


Рис. 5. Профиль поверхности подложки с покрытием, описанный параболическими функциями, H – высота пика (нм), x – координата пика (мкм).

средние значения электрического потенциала, полученные для нескольких произвольных пиков, находящихся в разных областях сканированного изображения. Полученная зависимость коэффициента a от электрического потенциала, измеренного на пиках структурных элементов покрытия, представлена на рис. 6.

Для определения значения шероховатости покрытия, оказывающего наибольший эффект на величину потенциала, были проведены измерения потенциалов и высот соответствующих точек поверхности покрытия с шагом сканирования поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По результатам сканирования поверхности зондом Кельвина с шагом сканирования $\Delta x = \Delta y = 5$ мкм построили трехмерную гистограмму (рис. 7), где ось OX соответствует высотам точек поверхности (h), ось OY – значениям потенциала поверхности (φ) в этих же точках, а $n = f(\varphi, h)$ определяет количество точек поверхности, имеющих заданные значения величин φ и h .

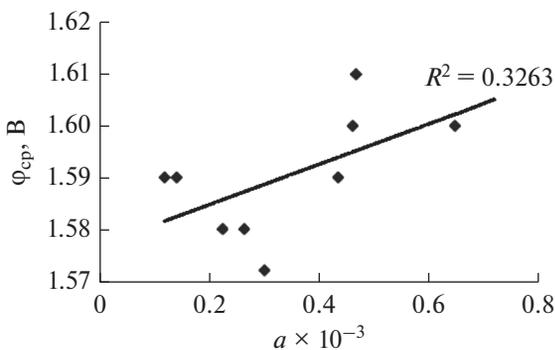


Рис. 6. Зависимость коэффициента a от среднего значения электрического потенциала.

При анализе формы гистограммы в плоскости (φ, h) , (рис. 8, вид на гистограмму сверху) можно выделить область в форме эллипса, описываемую следующим уравнением:

$$\frac{h^2}{A^2} + \frac{\varphi^2}{B^2} = 1,$$

где A и B – величины полуосей эллипса, равные 0.23 мкм и 0.06 В соответственно. Следовательно, уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{h^2}{0.05} + \frac{\varphi^2}{0.36} = 1.$$

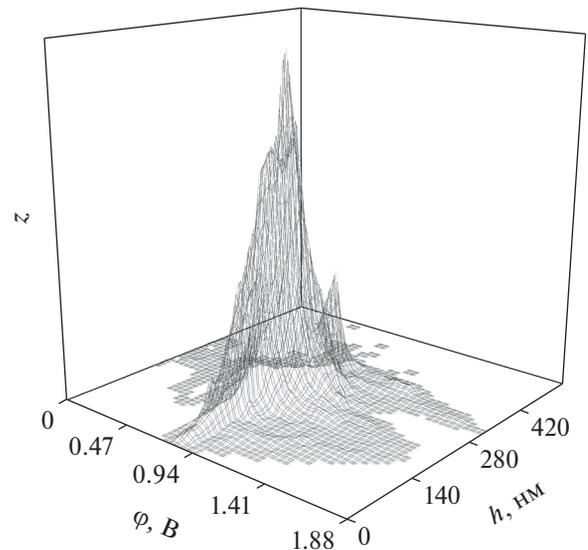


Рис. 7. Гистограмма распределения точек поверхности кальций-фосфатного покрытия по значениям их потенциалов и высот.

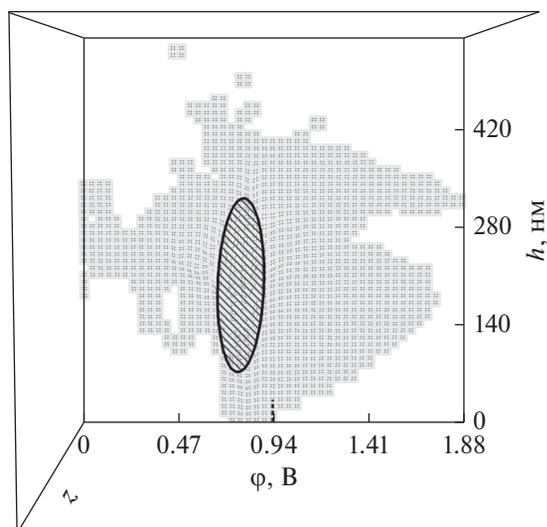


Рис. 8. Вид сверху на гистограмму распределения высот точек поверхности покрытия и соответствующих этим высот значений потенциала с выделенной областью в форме эллипса, где локализован максимум распределения.

В пределах эллипса гистограмма имеет острый максимум, локализованный в точке с координатами ~ 0.25 мкм и ~ 0.8 В.

Таким образом, наблюдается корреляция между значениями потенциала поверхности и высот точек поверхности (шероховатости) ВЧ-магнетронного кальций-фосфатного покрытия. Максимальное количество точек поверхности покрытия имеет потенциал, лежащий в интервале значений 0.67–0.90 В, в то время как высота этих точек имеет значение 77–326 нм, а гистограмма имеет один острый максимум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кальций-фосфатное покрытие, полученное на подложках “чистого” титана методом ВЧ-магнетронного распыления твердофазной мишени из гидроксиапатита, является электретным, т.е. несет электрический заряд. Распределение электрического потенциала по поверхности покрытия имеет неравномерный характер: его максимальная величина локализована в области вблизи структурных элементов (вершин) поверхности покрытия с более высоким значением остроты пика. Между потенциалом поверхности и шероховатостью покрытия имеется корреляция. Трехмерная гистограмма распределения точек поверхности по значениям потенциалов и высот имеет острый максимум, локализованный в точке с координатами ~ 0.8 В и ~ 0.25 мкм соответственно. Предварительная подготовка поверхности с

созданием рельефа с высотами точек в интервале 77–326 нм ведет к значительному увеличению потенциала в диапазоне 670–900 мВ. Полученные значения работы выхода электронов с поверхности кальций-фосфатного покрытия выше значений работы выхода с поверхности без покрытия (5.02 ± 0.05 и 4.65 ± 0.05 эВ соответственно). Более высокие значения работы выхода сопровождаются усилением эффекта адгезии клеток костной ткани к поверхности покрытий по сравнению с поверхностью титановой подложки. Следовательно, улучшается и остеоинтеграция имплантата с кальций-фосфатным электретным покрытием, введенного в костную ткань.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН, 2013–2020 гг., проект № III.23.2.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dorozhkin S. // *Materials*. 2009. V. 2. P. 1975–2045.
2. Surmenev R.A. // *Surf. Coat. Tech.* 2012. V. 206. № 89. P. 2035.
3. Kulyashova K., Sharkeev Yu., Glushko Yu. et al. // *AIP Conf. Proc.* 2015. V. 1683. P. 020113 (1–4).
4. Khlusov I.A., Dekhtyar Yu., Sharkeev Yu.P. et al. // *Materials*. 2018. V. 11. P. 978 (1–25).
5. Астафуров С.В., Шилько Е.В., Овчаренко В.Е. и др. // *Физ. мезомех.* 2014. Т. 17. № 3. С. 53.
6. Ciavarella M., Papangelo A. // *Физ. мезомех.* 2017. Т. 20. № 5. С. 57.
7. Шаркеев Ю.П., Колобов Ю.Р., Карлов А.В. и др. // *Физ. мезомех.* 2005. Т. 8. № 5. С. 83.
8. Gnedenkov S.V., Sharkeev Yu.P., Sinebryukhov S.L. et al. // *Inorg. Mater.* 2011. V. 2. № 5. P. 474.
9. Гостищев Э.А., Сурmenev P.A., Хлусов И.А. и др. // *Известия Томского политехнического университета*. 2011. Т. 319. № 2. С. 108.
10. Nakamura S., Takeda H., Yamashita K. // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. № 10. P. 5386.
11. Lang S.B., Tafail S.A.M., Kholkin A.L. et al. // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. P. 2215 (1–6).
12. Horiuchi N., Nakamura M., Nagai A. et al. // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112. P. 074901 (1–6).
13. Yamashita K., Oikawa N., Umegaki T. // *Chem. Mater.* 1996. V. 8. № 12. P. 2697.
14. Kobayashi T., Nakamura S., Yamashita K. // *J. Biomed. Mater. Res.* 2001 V. 57. № 4. P. 477.
15. Itoh S., Nakamura S., Nakamura M. et al. // *Biomaterials*. 2006 V. 32. P. 5572.
16. Itoh S., Nakamura S., Kobayashi T. et al. // *Calcif. Tissue Int.* 2006. V. 78. P. 133.
17. Bodhak S., Bose S., Bandyopadhyay A. // *Acta Biomater.* 2010. V. 6. P. 641.

18. Ueshima M., Nakamura S., Ohgaki M. et al. // Solid State Ionics. 2002. V. 151. P. 29.
19. Fu C., Savino K., Gabrys P. et al. // Chem. Mater. 2015. V. 27. № 4. P. 1164.
20. Bystrov V.S., Paramonova E.V., Dekhtyar Y. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2011. V. 23. № 6. P. 65.
21. Bystrov V.S., Paramonova E.V., Costa M.E.V. et al. // Ferroelectrics. 2013. V. 449. № 1. P. 94.
22. Шаркеев Ю.П., Глушко Ю.А., Куляшова К.С. и др. // Известия ВУЗов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/3. С. 268.
23. Nonnenmacher M., o'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. № 25. P. 2921.
24. Surmenev R., Vladescu A., Surmeneva M. et al. Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings. InTechOpen, 2017.
25. Prosolov K.A., Popova K.S., Belyavskaya O.A. et al. // Bioact. Mat. 2017. V. 2. № 3. P. 170–176.
26. Хан Г., Шаниро С. Статистические модели в инженерных задачах. Перевод с англ. М.: Изд-во Мир, 1969. 397 с.
27. Ito S., Murakami T.N., Comte P. et al. // Thin Solid Films. 2008. V. 516. P. 4613–4619.
28. Slepko A., Demkov A.A. // J. Chem. Phys. 2013. V. 139. № 4. P. 44714.

Electrical Potential and Topography of the Surface of Calcium Phosphate Coating Deposited with the RF-Magnetron Discharge

Yu. P. Sharkeev^{1,2}, K. S. Popova^{1,*}, K. A. Prosolov^{1,2,**}, E. Freimanis³, Yu. Dekhtyar³, I. A. Khlusov^{2,4}

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

³*Institute of Biomedical Engineering and Nanotechnologies, Riga Technical University, Riga, LV-1658 Latvia*

⁴*Siberian State Medical University, Tomsk, 634050 Russia*

*e-mail: kseniya@ispms.tsc.ru

**e-mail: konstprosolov@gmail.com

The correlations research of the surface electric potential of electret calcium phosphate coatings formed by the RF-magnetron sputtering method and the surface topography were performed. It has been determined that the electric potential over the coating surface has irregular distribution. The highest value of the potential is localized in the region near the structural element with a higher peak sharpness value. Spots of the coating surface having maximum potential within the range of 670–900 mV are matching a profile of points with heights in the range of 77–326 nm. Higher values of the electron work function from the surface of the coating as compared to titanium surface without coating suggest that the adhesion effect of osteoblasts and osteoclasts to the surface of calcium phosphate coatings is enhanced.

Keywords: RF-magnetron coating, electrical potential, surface topography, sharpness of peak, photoelectron spectroscopy, atomic force microscopy, Calvin probe.