

УДК 533.9

Компьютерная микрофотографическая статистика частиц и пор в плазмонапыленных покрытиях титан/гидроксиапатит

Л. А. Большаков, И. В. Родионов, Е. В. Салимжанова, Ю. В. Серянов
Саратовский государственный технический университет, Саратов, Россия

Разработана компьютерная программа Plotcals для обработки оптических микрофотографий методом фотографических проекций с определением средней открытой пористости биоактивных гидроксиапатитовых покрытий, наносимых электродуговым плазменным напылением.

Электродуговое плазменное напыление гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ или фторгидроксиапатита $\text{Ca}_{10}\text{F}(\text{PO}_4)_6\text{OH}$ является чуть ли не единственной надежной технологией получения адгезионно-прочных биоактивных покрытий титановых дентальных имплантатов [1, 2]. Физиологически важным свойством таких покрытий является их высокая открытая пористость, которая проще всего определяется методом микро-

фотографических проекций [3]. При этом на визуальную реализацию метода требуется 5–6 ч, в течение которых экспериментатор должен пересчитать и определить размеры около 3–5 тыс. элементов темнопольного изображения с максимально возможным напряжением внимания.

Перевод микрофотографий в цифровую форму и применение современных компьютерных технологий позволяют сократить время обработ-

ки информации примерно в 300 раз, а также повысить объективность и точность метода.

Рассмотрим вначале принципы микрофотографической статистики плазмонапыленных частиц — элементов светлопольного изображения с радиусами r_p , изменяющимися в пределах от r_p^{\min} до r_p^{\max} , где r_p^{\min} и r_p^{\max} — минимальный и максимальный радиусы частиц на микрофотографии, соответственно.

Если N — общее число частиц и $N(r_p)$ — число частиц с радиусом r_p , то статистическая частота $\Phi \leq 1$ как функция радиуса может быть выражена в виде

$$\Phi(r_p) = \frac{N(r_p)}{N}.$$

Разработанная нами компьютерная программа находит, наряду с самим радиальным распределением статистической частоты $\Phi(r_p)$, такие параметры этого распределения, как модальный радиус r_p^{mod} и модальная частота Φ_{mod} , т. е. радиус частиц, соответствующий наибольшему максимуму $\Phi(r_p)$

$$\Phi_{\text{mod}} = \Phi(r_p^{\text{mod}}) = \max[\Phi(r_p)];$$

размах варьирования Δr_p

$$\Delta r_p = r_p^{\max} - r_p^{\min};$$

средний радиус частиц \bar{r}_p

$$\bar{r}_p = \frac{\int_{r_p^{\min}}^{r_p^{\max}} \Phi(r_p) r_p dr_p}{\int_{r_p^{\min}}^{r_p^{\max}} \Phi(r_p) dr_p}; \quad (1)$$

среднеквадратичное отклонение радиуса частиц S_p

$$S_p = \sqrt{\frac{\int_{r_p^{\min}}^{r_p^{\max}} \Phi(r_p) (r_p - \bar{r}_p)^2 dr_p}{\int_{r_p^{\min}}^{r_p^{\max}} \Phi(r_p) dr_p}}; \quad (2)$$

дисперсия σ_p

$$\sigma_p = S_p^2;$$

коэффициент вариации V_p

$$V_p = \frac{S_p}{\bar{r}_p} \cdot 100\%.$$

Интегралы в (1) и (2) рассчитывались численным методом трапеций при разбиении интервала измерения радиуса частиц на 20 равных частей.

Микрофотографическая статистика открытых пор — элементов темнопольного изображения описывается аналогичным образом, а именно распределение статистической частоты пор $\Psi \leq 1$ по их радиусу r_{por} отвечает соотношению

$$\Psi(r_{\text{por}}) = \frac{M(r_{\text{por}})}{M},$$

где $M(r_{\text{por}})$ — число пор с радиусом r_{por} и M — общее число пор на микрофотографии, причем радиус их измеряется в пределах от минимального r_{por}^{\min} до максимального r_{por}^{\max} .

Модальный радиус пор $r_{\text{por}}^{\text{mod}}$ и модальная частота Ψ_{mod} находятся по соотношению

$$\Psi_{\text{mod}} = \Psi(r_{\text{por}}^{\text{mod}}) = \max[\Psi(r_{\text{por}})],$$

размах варьирования Δr_{por} — по разнице между максимальным и минимальным радиусами пор

$$\Delta r_{\text{por}} = r_{\text{por}}^{\max} - r_{\text{por}}^{\min};$$

средняя открытая пористость $\bar{\Pi}$ по уравнению

$$\bar{\Pi} = 100\% \left[1 + \frac{r_{\text{por}}^{\max} - r_{\text{por}}^{\min}}{r_p^{\max} - r_p^{\min}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\int_{r_p^{\min}}^{r_p^{\max}} \Phi(r_p) dr_p}{\int_{r_{\text{por}}^{\min}}^{r_{\text{por}}^{\max}} \Psi(r_{\text{por}}) dr_{\text{por}}} \right]^{-1}; \quad (3)$$

средний радиус пор \bar{r}_{por} из формулы

$$\bar{r}_{\text{por}} = \frac{\int_{r_{\text{por}}^{\min}}^{r_{\text{por}}^{\max}} \Psi(r_{\text{por}}) r_{\text{por}} dr_{\text{por}}}{\int_{r_{\text{por}}^{\min}}^{r_{\text{por}}^{\max}} \Psi(r_{\text{por}}) dr_{\text{por}}}; \quad (4)$$

среднеквадратичное отклонение радиуса пор S_{por} в виде

$$S_{\text{por}} = \sqrt{\frac{\int_{r_{\text{por}}^{\min}}^{r_{\text{por}}^{\max}} \Psi(r_{\text{por}}) (r_{\text{por}} - \bar{r}_{\text{por}})^2 dr_{\text{por}}}{\int_{r_{\text{por}}^{\min}}^{r_{\text{por}}^{\max}} \Psi(r_{\text{por}}) dr_{\text{por}}}}; \quad (5)$$

дисперсия σ_{por} как

$$\sigma_{\text{por}} = S_{\text{por}}^2;$$

коэффициент вариации V_{por}

$$V_{\text{por}} = \frac{S_{\text{por}}}{\bar{r}_{\text{por}}} \cdot 100\%.$$

Интегралы в (3)—(5) рассчитывались по методу трапеций при разбиении интервала изменения радиуса пор на 20 равных частей.

На рис. 1, *a* представлена микрофотография типичной поверхности плазмонанпыленного покрытия титан/гидроксиапатит. Сканирование этой микрофотографии в монохромном режиме (см. рис. 1, *б*) с применением к полученному массиву данных нашей компьютерной программы Plotcals позволило получить сходные параметры радиальных распределений (таблица).

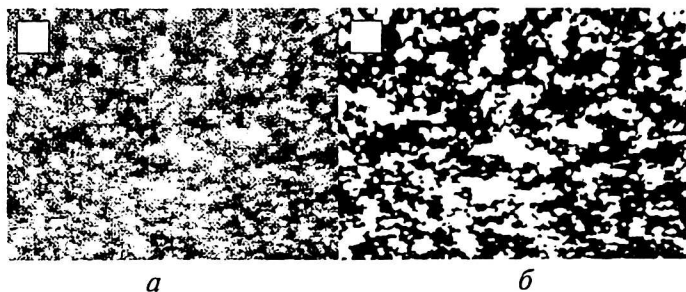


Рис. 1. Поверхность плазмонанпыленного покрытия титан/гидроксиапатит:

a — микрофотография (90^х); *б* — монохромная копия микрофотографии (90^х), обработанная программой Plotcals

Поскольку электродуговое плазменное напыление порошков является высокоэнтропийным процессом, то его результаты должны подчиняться нормальному закону Гаусса [4], который в данном случае может быть записан следующим образом:

$$\Phi(r_p) = \Phi_{\text{mod}} e^{-\frac{(r_p - r_p^{\text{mod}})^2}{2\sigma_p}} -$$

для микрофотографической статистики частиц и

$$\Psi(r_{\text{por}}) = \Psi_{\text{mod}} e^{-\frac{(r_{\text{por}} - r_{\text{por}}^{\text{mod}})^2}{2\sigma_{\text{por}}}} -$$

для микрофотографической статистики открытых пор.

Как видно из данных рис. 2, экспериментальная статистика частиц и открытых пор в плазмонанпыленном покрытии титан/гидроксиапатит действительно удовлетворительно подчиняется нормальному закону Гаусса с вышеуказанными параметрами распределений.

Радиальные распределения микрофотографической статистики плазмонанпыленных частиц и открытых пор в титан/гидроксиапатитовом покрытии

Вид элемента	Параметры									
	r^{min} , МКМ	r^{max} , МКМ	Δr , МКМ	r^{mod} , МКМ	Φ_{mod} Ψ_{mod}	\bar{r} , МКМ	S , МКМ	σ , МКМ ²	V , %	\bar{P} , %
Частицы	2	10	8	5	0,36	4,86	1,53	2,35	31,6	—
Поры	1	10	9	6	0,31	5,51	1,66	2,76	30,2	47,3

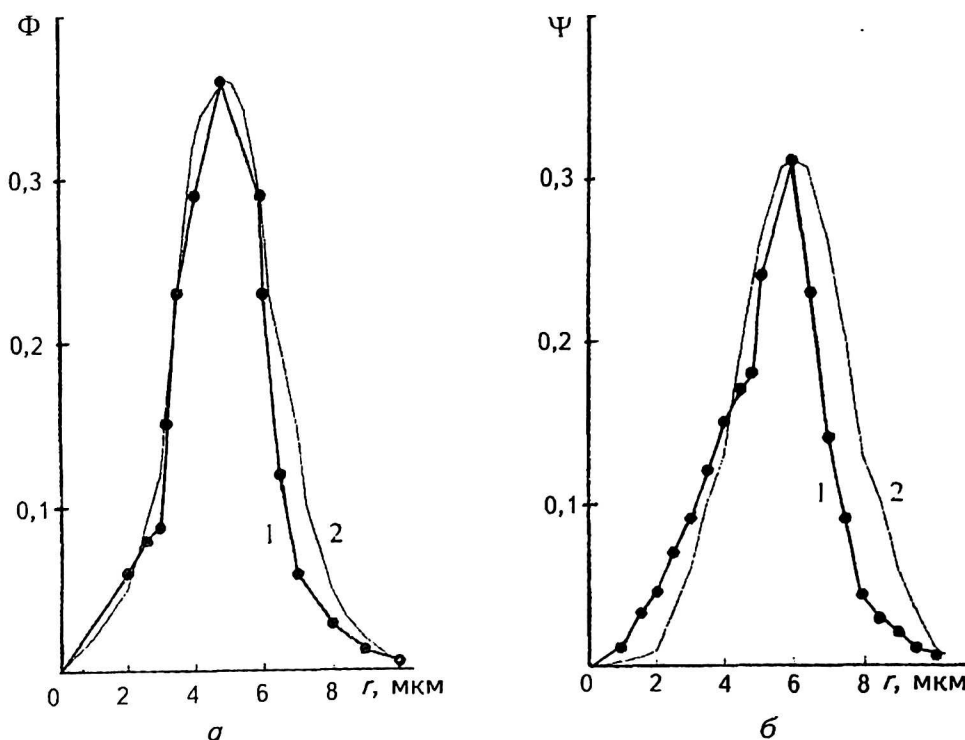


Рис. 2. Результаты компьютерной микрофотографической статистики частиц (*a*) и открытых пор (*б*): 1 — экспериментальные радиальные распределения статистических частот; 2 — нормальный закон Гаусса

Разработанный статистический метод при времени компьютерной обработки микрофотографий порядка 3—5 мин пригоден для экспрессного неразрушающего контроля качества электродугового плазменного напыления биоактивных гидроксиапатитовых или фторгидроксиапатитовых покрытий на титановые дентальные имплантаты, мелкосерийное производство которых успешно реализуется в НПА “Плазма Поволжья” при Саратовском государственном техническом университете.

Л и т е р а т у р а

1. Лясников В. Н., Петров В. В., Атоян В. Р., Чеботаревский Ю. В. Применение плазменного напыления в производстве имплантатов для стоматологии/ Под ред. В. Н. Лясникова. — Саратов: Изд-во Саратов. техн. ун-та, 1993. — 40 с.
2. Лясников В. Н., Украинский В. С., Богатырев Г. Ф. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники. — Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1985. — 200 с.
3. Хасуй А. Техника напыления: Пер. с яп./ Под ред. В. С. Блохина и Е. В. Мельникова. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.
4. Боровков А. А. Курс теории вероятностей. — М.: Наука, 1972. — 532 с.

Computer microphotographic statistics of particles and pores in plasma-sprayed coats of titanium/hydroxyapatite

L. A. Bolshakov, I. V. Rodionov, E. V. Salimzhanova, Yu. V. Seryanov
Saratov State Technical University, Saratov, Russia

The Plotcals computer program has been developed for handling the optical photomicrographs by the method of photographic projections with definition of an average unclosed porosity of biofissile hydroxyapatite coats, superimposed by the electric-arc plasma deposition.

* * *