

УДК 621.793.7
В 65

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ И ФИГУРЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ГИДРОКСИАПАТИТА

С. Г. Войнарович, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев

Аннотация. Исследовано формирование пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксиапатита. Определены потери напыляемого материала из-за геометрического фактора.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, гидроксиапатит, коэффициент использования материала, эндопротезы.

Анотація. Досліджено формування плями напилення і фігури металізації в умовах мікроплазмового напилення покриття з гідроксиапатиту. Визначено втрати напилюваного матеріалу через вплив геометричного фактору.

Ключові слова: мікроплазмове напилення, гідроксиапатит, коефіцієнт використання матеріалу, ендопротези.

Abstract. The formation of spot deposition and figure of metallization under microplasma deposition of coatings from hydroxyapatite is investigated. The loss of spray material due to the geometric factor is defined.

Keywords: microplasma deposition, hydroxyapatite, deposition efficiency, endoprosthesis.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время все более широкое распространение получают металлические имплантаты с покрытием из биокерамических материалов, в которых механическая прочность металлической основы сочетается с биологическими особенностями биокерамического покрытия. Такие покрытия обладают тройным положительным эффектом: повышением скорости формирования костной ткани, возможностью образования связи с костью (остеоинтеграция) и снижением образования продуктов коррозии металла. Это позволяет значительно сократить продолжительность вживления эндопротеза, обеспечить прочную связь с костью и увеличить надежность имплантатов. Одним из наиболее распространенных биокерамических материалов, применяющихся в качестве покрытий, является керамика на основе фосфата кальция — гидроксиапатит (ГА) либо близкие к нему по составу другие фосфаты кальция.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В последние годы выполнен целый ряд исследовательских работ по нанесению биокерамических покрытий различными методами газотермического напыления: традиционным плазменным напылением в атмосфере [4, 9–12, 15, 17, 18], плазменным напылением в динамическом вакууме [4, 8], высокочастотным плазменным напылением [6], а также высокоскоростным газоплазменным напылением [4, 7, 10]. Недостатком всех этих технологий является потеря значительной части порошка биокерамики в процессе

напыления, особенно при напылении на поверхность малых объектов, таких, как зубные эндопротезы. Основная причина этих потерь связана со сравнительно большим размером пятна напыления (15...25 мм). Эти потери возможно значительно сократить с помощью техники микроплазменного напыления [1, 3, 13, 14].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследовать формирование пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксиапатита, определить потери напыляемого материала из-за геометрического фактора в зависимости от размера обрабатываемой детали.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для анализа потерь материала из-за геометрического фактора были проведены эксперименты по определению параметров фигуры металлизации, которая описывает распределение массы материала покрытия в пятне напыления. Для анализа фигуры металлизации производили напыление при неподвижном плазмотроне в одну точку на плоские образцы в течение 5 с и измеряли вертикальную (большую) L и горизонтальную (меньшую) l оси пятна напыления, а также максимальную высоту напыленной горки h (рис. 1).

Затем при помощи цифрового фотоаппарата проводили макросъемку профилей фигуры металлизации в направлениях, перпендикулярных ее осям. Полученные изображения обрабатывали и определяли координаты профиля фигуры. По этим координатам с помощью программы MathCad строилась фигура металлизации, определялись описывающая ее функция и площадь фигуры для большей и меньшей осей.

Имея данные о размерах фигуры металлизации, можно определить такой параметр, как угол раскрытия плазменной струи

$$\beta = 0,5 \arctan\left(\frac{L}{2H}\right). \quad (1)$$

Потери материала из-за геометрического фактора определялись как

$$\Pi\% = \left(1 - \frac{S_{x-x}}{S_{\text{общ}}}\right) \cdot 100,$$

где $S_{\text{общ}}$ — общая площадь фигуры металлизации (рис. 2); S_{x-x} — площадь фигуры металлизации, ограниченная размером детали.

Напыление проводили на установке микроплазменного напыления МПН-004. В качестве материала для напыления использовали порошок гидроксипатита КЕРГАП с размером частиц 40...63 мкм.

Интервалы варьирования, значения исследуемых параметров и результаты эксперимента по определению параметров фигуры металлизации при микроплазменном напылении представлены в таблице.

Установлено, что пятно напыления при микроплазменном напылении порошка ГА имеет форму эллипса с соотношением осей 1,1...1,3 в зависимости от параметров процесса напыления. Вероятно, это вызвано тем, что при подаче порошка с использованием дозатора МД-004 на частицы порошка действует сила тяжести, направлен-

ная перпендикулярно оси струи. На данном оборудовании технически не представляется возможным реализовать схему нанесения покрытий, при которой действие силы тяжести будет направлено вдоль оси двухфазной плазменной струи. Так как частицы порошка отличаются размером, а следовательно, массой и аэродинамическим сопротивлением, то под влиянием силы тяжести они будут проникать в струю на разную глубину в направлении действия силы тяжести. При таких условиях получаемое пятно напыления будет иметь форму эллипса, большая ось которого расположена в вертикальной плоскости (т. е. совпадает с направлением действия силы тяжести) — см. рис. 1. Анализ характера кривых, описывающих изменение толщины фигуры металлизации, свидетельствует, что она достаточно надежно описывается функцией Гаусса $y = y_0 \cdot e^{-kx^2}$.

С использованием экспериментальных данных измерений профиля фигур металлизации, полученных при микроплазменном напылении (измерения проводили по большей L и меньшей осям l — см. рис. 1), были построены совпадающие с ними кривые Гаусса для различных режимов напыления (коэффициент корреляции R составил 0,933...0,996 — рис. 3, значение k изменялось в диапазоне 0,09...0,31).

В результате проведенных расчетов согласно (1) установлено, что угол раскрытия микроплазменной струи находится в пределах 2,5...9,0°. Полученные результаты соответствуют значениям, приводимым в литературе для ламинарных плазменных струй [2].

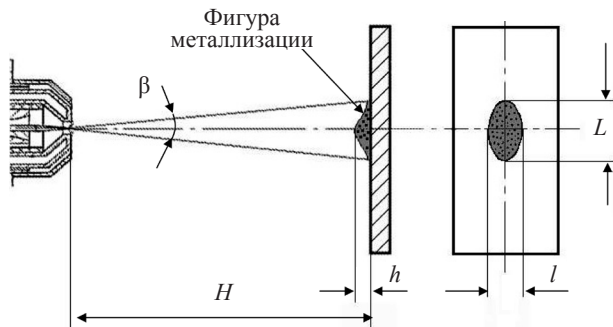


Рис. 1. Схема исследования фигуры металлизации

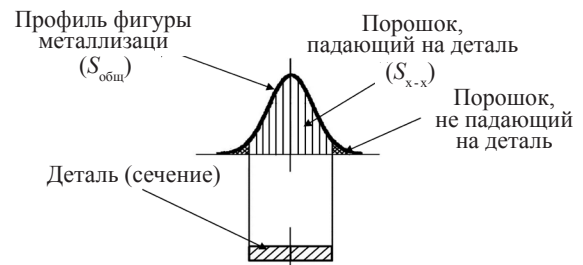


Рис. 2. Потери материала из-за геометрического фактора

Таблица 1. Параметры фигуры металлизации в зависимости от параметров напыления ГАП

№ п/п	I, А	G _{пор} , л/мин	H, мм	P _{пор} , г/мин	Высота фигуры металлизации, мм	Оси, мм	
						большая	меньшая
1	45	120	160	1,2	4,5	15	13
2	45	120	80	0,4	1	8,5	8
3	45	60	160	0,4	1	11	10
4	45	60	80	1,2	7,1	13	10
5	35	120	160	0,4	0,8	8,5	8
6	35	120	80	1,2	2,6	9,5	8
7	35	60	160	1,2	3,1	13	10
8	35	60	80	0,4	1,5	12	9,5
9	40	90	120	0,8	2,4	11,5	10

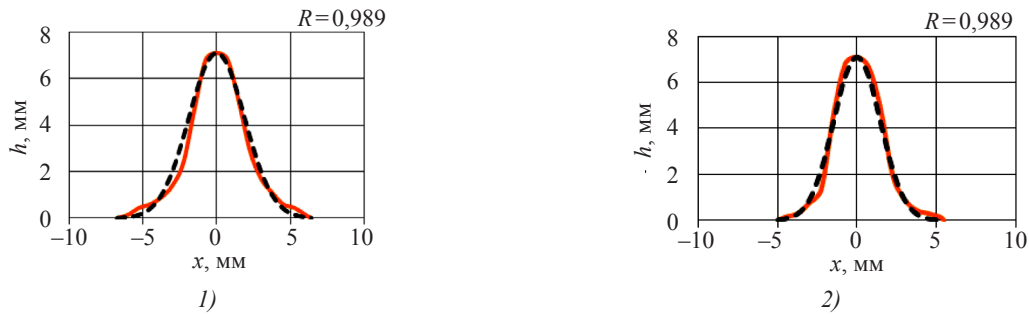


Рис. 3. Поперечные сечения фигур металлизации по осям пятна напыления: 1 — сечение фигуры напыления по большей оси, $y = 7,1 \cdot e^{-0,14x^2}$; 2 — сечение фигуры напыления по меньшей оси, $y = 7,1 \cdot e^{-0,23x^2}$; - - - — график распределения Гаусса (расчетный), — — — фактический профиль фигуры металлизации

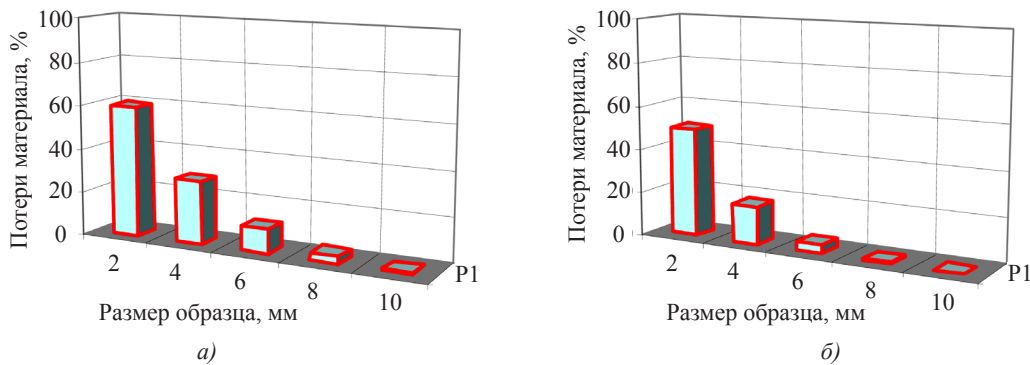


Рис. 4. Потери напыляемого материала из-за геометрического фактора в зависимости от размера напыляемой детали: а — для большей диагонали; б — для меньшей диагонали

Проведенные для каждого опыта расчеты потерь напыляемого материала из-за геометрического фактора в зависимости от размера напыляемой детали показывают, что при данных значениях параметров микроплазменного напыления эти потери составляют менее 10% при напылении на детали размером 8 мм и практически исчезают при размерах детали свыше 10 мм.

Приведенные в работе [3] результаты исследований влияния параметров микроплазменного напыления на коэффициент использования материала (КИМ) при напылении порошка гидроксиапатита показывают, что наиболее высокого значения КИМ достигает в условиях 4-го режима напыления (см. таблицу) — 89%. Изменение этих потерь в зависимости от размера напыляемой детали для 4-го режима напыления показано на рис. 4.

Таким образом, суммарные потери материала (на отскок, разбрызгивание и потери из-за геометрического фактора) при микроплазменном напылении

на имплантаты малых размеров (4...10 мм) составят 20...40 %, тогда как при традиционном плазменном напылении величина таких потерь — порядка 83...88 % [16].

ВЫВОДЫ

1. Полученная в результате формирования покрытия из гидроксиапатита в условиях микроплазменного напыления фигура металлизации имеет профиль, с высокой точностью описываемый распределением Гаусса (коэффициент корреляции 0,933...0,996), а пятно напыления — форму эллипса с соотношением осей 1,1...1,3 и размером 8...15 мм в зависимости от параметров процесса напыления.

2. Установлено, что суммарные потери материала (на отскок, разбрызгивание и из-за геометрического фактора) при микроплазменном напылении на имплантаты размером 4...10 мм составляют 20...40 %, а при традиционном плазменном напылении порядка 83...88 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Войнарович, С. Г. Влияние параметров микроплазменного напыления на коэффициент использования материала при напылении биокерамического покрытия [Текст] / С. Г. Войнарович // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — №4 (433). — С. 58–61.
- [2] Митин, Б. С. Порошковая металлургия и напыленные покрытия [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин ; под ред. Б. С. Митина. — М. : Металлургия, 1987. — 792 с.

- [3] Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления [Текст] / Ю.С. Борисов, Ю.Н. Переверзев, С.Г. Войнарович, В.Г. Бобрик // Автоматическая сварка. — 1999. — №6. — С. 53–55.
- [4] **Brown, S. R.** Acoustic Emission Analysis of Thermal Sprayed Hydroxyapatite Coatings Examined under Four Point Bend Loading [Text] / S.R. Brown and I.G. Turner // Surface Engineering. — 1998. — 14 (4). — P. 309–313.
- [5] **Bouyer, E.** The Suspension Plasma Spraying of Bioceramics by Induction Plasma [Text] / E. Bouyer, F. Gitzhofer, M. I. Boulos // JOM. — 1997, February. — P. 58–62.
- [6] **Cheang, P.** Bioceramic Powder and Coatings by Thermal Spray Techniques [Text] / P. Cheang, K.A. Khor // Proceedings of International Spray Conference. — Kobe, Japan, 1995. — P. 181–186.
- [7] **de Blicck-Hogervorst, J.F.A.** Influence of Different Gases on Mechanical and Physical Properties on HVOF Sprayed Tungsten Carbide Cobalt [Text] / J.F.A. de Blicck-Hogervorst // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. — Orlando, USA, 1992. — P. 153–158.
- [8] **Heimann, R. B.** Low-Pressure Plasma-Sprayed (LPPS) Bioceramic Coatings with Improved Adhesion Strength and Resorption Resistance [Text] / R. B. Heimann, T.A. Vu // Journal of Thermal Spray Technology. — 1997. — 6 (12). — P. 145–149.
- [9] **Kay, J. F.** Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coatings for Enhanced Biocompatibility [Text] / J. F. Kay // Materials Technology. — 1993. — 8 (1/2). — P. 26–29.
- [10] **Khor, K.A.** The Thermal Spray Processing of HA Powders and Coatings [Text] / K.A. Khor, P. Cheang, Y. Wang // JOM. — 1997, February. — P. 51–57.
- [11] **Khor, K.A.** Plasma Spraying of Combustion Flame Spheroidized Hydroxyapatite (HA) Powders [Text] / K.A. Khor, P. Cheang and Y. Wang // Journal of Thermal Spray Technology. — 1998. — 7 (2). — P. 254–260.
- [12] **McPherson, R.** Structural Characterisation of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings [Text] / R. McPherson, N. Gane, T.J. Bastow // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. — 1995. — Vol. 6. — P. 327–334.
- [13] Microplasma Spraying [Text] / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Y. Pereverzev, V. Balakin, R. Smith // Proceedings of the 14 th International Thermal Spray Conference. — Kobe, Japan. — 1995. — P. 273–274.
- [14] Microplasma Spraying [Text] / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Y. Pereverzev, S. Voynarovitch [et al.] // Proceedings of the 15 th International Thermal Spray Conference. — Nice, France, 1998. — P. 1461–1467.
- [15] Plasma Sprayed Coatings of Hydroxyapatite [Text] / K. de Groot, R. T.G. Geesink, C.P.A.T. Klein and P. Serakian // Journal Biomedical Materials Research. — 1987. — Vol. 21. — P. 1375–1381.
- [16] **Poulmaire, D.** Development of Dental Implants in Titanium with HA Coatings [Text] / D. Poulmaire, M. Ducos, Y. Setti // 2-nd Plasma-Technik-Symposium. — Lucerne, Switzerland. — 1991. — P. 191–202.
- [17] **Wang, Y.** Thermal Spraying of Functionally Graded Calcium Phosphate Coatings for Biomedical Implants [Text] / Y. Wang, K.A. Khor and P. Cheang // Journal of Thermal Spray Technology. — 1998. — 7 (1). — P. 50–57.
- [18] The Influences of Plasma Spraying Parameters on the Characteristics of Hydroxyapatite Coatings: a Quantitative Study [Text] / C. Y. Yang, B. C. Wang, E. Chang, J. D. Wu // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. — 1995. — Vol. 6. — P. 249–257.

© С.Г. Войнарович

Надійшла до редколегії 17.05.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. О.М. Дубовий

Статтю розміщено у Віснику НУК №3, 2012