

tivity of ruthenium (II) polypyridyl complexes. *Eur. J. Med. Chem.* 45 564–571 View full aims & scope.

4. Pandrala M., Li F., Feterl M., Mulyana Y., Warner J.M., Wallace L., Keene F.R., Grant J. Collins. 2013 Chloride-containing ruthenium(II) and iridium(III) complexes as antimicrobial agents. *Dalton Trans.* 42 4686–4694 Web of Science, Scopus.

5. Suss-Fink, Arene G. 2010 Ruthenium complexes as anticancer agents. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 39 1673–1688.

УДК 544.227

А.В. Поспелов, А.А. Касач, И.И. Курило  
БГТУ (г. Минск, Республика Беларусь)

### **СТРУКТУРА ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ СПЛАВАХ МАГНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

В последние годы магниевые сплавы привлекают значительное внимание в связи с возможностью использования их в качестве ортопедических имплантатов [1]. Это связано с их уникальным сочетанием механических свойств и биосовместимости. Магниевые сплавы имеют оптимальное соотношение прочности и веса, что делает их альтернативой традиционным материалам для имплантатов, таким как титан и нержавеющей сталь. Необходимо отметить, что магний и его сплавы используются для изготовления биорезорбируемых имплантатов, т. е. происходит разрушение имплантата посредством клеточных и ферментативных реакций. Кроме того, было доказано, что магний способствует формированию новой костной ткани [2].

Однако существуют проблемы, препятствующие широкому использованию магниевых сплавов в качестве ортопедических имплантатов. Одной из основных проблем является высокая скорость коррозии магниевых сплавов в средах организма человека, что приводит к образованию гидроксида магния и газообразного водорода. В физиологической среде из-за присутствия высоких концентраций хлорид-ионов наряду с гидроксидом образуется хлорид магния, гидролиз которого приводит к локальному повышению рН в приповерхностной области и способствует увеличению скорости коррозии магниевых имплантатов [3].

Для решения проблемы быстрой коррозии магниевых сплавов в физиологической среде используют либо различные методы модифи-

кации поверхности, либо изменение микроструктуры сплава путем добавления легирующих элементов. Добавление в магний легирующих редкоземельных элементов (РЗЭ), например, иттрия и неодима (сплав WE43), улучшает его механические свойства и повышает коррозионную устойчивость [4].

Эффективным способом модификации поверхности сплавов магния является плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) [5]. Покрытия, полученные с помощью ПЭО, обычно состоят из плотного и однородного оксидного слоя с наноструктурированной поверхностью, который обеспечивает защиту от коррозии. Химический состав, толщина покрытий, а также их функциональные свойства могут быть изменены варьированием параметров процесса ПЭО, таких как плотность электрического тока и концентрация электролита.

Цель работы – исследование структуры и элементного состава защитного покрытия, сформированного на поверхности сплава магния WE43 методом ПЭО.

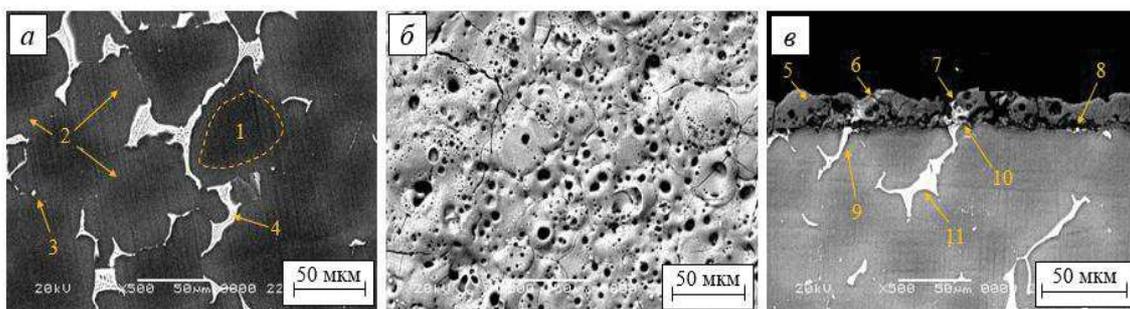
В качестве объекта исследования использовали магниевый сплав WE43. Перед проведением плазменно-электролитического оксидирования образцы шлифовали наждачной бумагой в среде этилового спирта, после чего подвергали ультразвуковой очистке в течение 5 мин.

ПЭО предварительно подготовленных образцов сплава WE43 проводили в электролите, содержащем, г/дм<sup>3</sup>: Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – 10; NaOH – 1. ПЭО проводили в импульсном режиме при скважности импульсов 2 и частоте 2 Гц. Анодная плотность тока импульса составляла 30 А/дм<sup>2</sup>, длительность обработки – 450 с. Материалом катода служила нержавеющая сталь.

Структуру и элементный состав поверхности исследуемых образцов сплава WE43 изучали с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-5610 LV (Jeol Ltd. Япония), оснащенного системой энергодисперсионного рентгеновского спектрального анализа JED-2201 (EDX).

На рисунке 1 представлены СЭМ изображения поверхности образца сплава магния WE43 до (рисунок 1а) и после ПЭО (рисунок 1б), а также изображение поперечного шлифа образца с ПЭО покрытием (рисунок 1в).

Как видно из рисунка 1а сплав WE43 характеризуется сетчатой микроструктурой, выраженной несколькими фазами. Основной фазой ( $\alpha$ -фазой) является магний с низким процентным содержанием легирующих элементов (рисунок 1а, область 1).  $\beta$ -фаза представляет собой менее однородную фазу с более высокой концентрацией РЗЭ.



**Рисунок 1 – СЭМ изображение поверхности образца сплава WE43 до ПЭО (а), после ПЭО (б), поперечного шлифа образца WE43 с ПЭО покрытием (в).**

Кроме того, на рисунке 1а и 1в наблюдаются контрастные области, которые относятся к интерметаллическим частицам (ИМЧ). Состав ИМЧ представлен соединениями магния с редкоземельными элементами (Mg-РЗЭ), а также фазой циркония. Данные точечного EDX анализа указанных на рисунке 1 областей приведены в таблице 1.

На рисунке 1б представлено СЭМ изображение поверхности сплава WE43 после ПЭО. Как видно из полученной микрофотографии, при анодной плотности тока  $30 \text{ А/дм}^2$  в течение 450 с на поверхности магниевое сплава формируется покрытие, характеризующееся пористой структурой с взаимосвязанными порами различных размеров и форм, что, вероятно, обусловлено повышенным газообразованием в процессе ПЭО.

Как видно из представленного СЭМ изображения поперечного шлифа образца WE43 с ПЭО (рисунок 1в), толщина сформированного покрытия составляет 15-20 мкм.

**Таблица 1 – Данные EDX анализа поверхности образца сплава WE43**

Образец и область	Элементный состав, мас.%							
	Mg	Y	Zr	Nd	Gd	Dy	O	P
WE43	91.0	4.8	0.7	3.0	0.3	0.2	–	–
WE43–ПЭО	44.4	3.6	–	1.2	0.1	0.1	37.2	13.4
1	100.0	–	–	–	–	–	–	–
2	94.2	3.2	–	2.6	–	–	–	–
3	35.4	–	64.6	–	–	–	–	–
4	78.2	2.3	–	16.9	0.4	2.2	–	–
5	48.7	–	–	–	–	–	42.6	8.7
6	48.9	2.8	–	7.7	0.6	0.8	35.2	4.0
7	84.6	–	–	13.2	2.2	–	–	–
8	46.6	5.0	31.7	14.4	1.9	0.4	–	–
9	78.7	3.6	–	16.2	1.5	–	–	–
10	96.7	–	–	3.3	–	–	–	–
11	84.0	3.6	–	11.1	1.3	–	–	–

Результаты энергодисперсионного рентгеновского спектрального анализа показали, что полученное ПЭО покрытие преимущественно состоит из Mg, O и P, что свидетельствует о формировании анодно-

оксидного покрытия, включающего оксиды и фосфаты магния, улучшающих его биосовместимость. Кроме того, в состав ПЭО покрытия входит незначительное количество легирующих элементов: Y (до 3.6 мас.%), Nd (до 1.2 мас.%), Gd (до 0.1 мас.%), Dy (до 0.1 мас.%).

Наличие в покрытии легирующих элементов, вероятно, обусловлено тем, что ИМЧ входящие в структуру сплава WE43 участвуют в формировании ПЭО покрытия, образуя обогащенные РЗЭ области.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ПЭО в импульсном режиме в пирофосфатном электролите позволяет сформировать на поверхности сплавов магния биосовместимые фосфатно-оксидные покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Junxiu, C. Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review / C. Junxiu, T. Lili, Y. Xiaoming, P.E. Iniobong, I. Muhammad, Y. Ke // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2018. – Vol. 87. – P. 68–79.

2. Yoshizawa, S. Magnesium ion stimulation of bone marrow stromal cells enhances osteogenic activity, simulating the effect of magnesium alloy degradation / S. Yoshizawa, A. Brown, A. Barchowsky, C. Sfeir // *Acta Biomater*. – 2014. – Vol. 10 (6). – P. 2834–2842.

3. Gonzalez, J. Magnesium degradation under physiological conditions - Best practice / J. Gonzalez, R.Q. Hou, E.P.S. Nidadavolu, R. Willumeit-Römer, F. Feyerabend // *Bioact Mater*. – 2018. – Vol. 3 (2). – P. 174–185.

4. Dvorsky, D. The effect of powder size on the mechanical and corrosion properties and the ignition temperature of WE43 alloy prepared by spark plasma sintering / D. Dvorsky, J. Kubasek, M. Roudnicka, F. Prusa, D. Necas, P. Minarik, J. Straska, D. Vojtech // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2021. – Vol. 9 (9). – P. 1349–1362.

5. Blawert, C. Plasma Electrolytic Oxidation/micro-Arc Oxidation of Magnesium and its Alloys / C. Blawert, S.P. Sah, N. Scharnagl, M.B. Kannan // *Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications* (Woodhead Publishing). – 2015. – P. 193–234.