

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАГНИЕВЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ИХ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Батуро М. А.<sup>1</sup>, Баландина А.Е.<sup>1</sup>, Дарюхина В.А.<sup>1</sup>

Научные руководители – канд. хим. наук, доцент Уласевич С. А.<sup>1</sup>, канд. хим. наук,  
доцент Масалович М.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

markbaturо@yandex.ru

### Введение

Восстановление поврежденных тканей с помощью биodeградируемых металлических имплантатов требует применения биосовместимых материалов, свойства поверхности которых определяют успешную интеграцию. Для металлов решающую роль в этом процессе играет способность образовывать стабильную оксидную пленку, которая обеспечивает устойчивость к коррозии [1]. Магний и его сплавы обладают модулем упругости, близкий к костной ткани, что предотвращает механические повреждения, и доказанную osteoconductive способность ионов  $Mg^{2+}$ , стимулирующих образование новой костной ткани [2]. Однако их широкому внедрению препятствует проблема чрезмерно высокой скорости деградации в физиологической среде, приводящая к преждевременной потере механической целостности и газообразованию [3]. Следовательно, текущие исследования направлены на замедление скорости коррозии магния с помощью легирования и многофункциональных покрытий.

### Основная часть

Используемый ультразвуковой метод модификации металлов предполагает окисление при ультразвуковом воздействии, что в свою очередь является важным аспектом формирования и стабилизации образующихся структур на поверхности [4]. В этом методе используется акустическая кавитация – образование, рост и насильственное схлопывание микропузырьков, инициируемых ультразвуковыми волнами в жидкой среде. В результате схлопывания микропузырьков локально достигаются экстремальные локальные условия, включая температуру до 5000 К, давление около 100 бар и высокую скорость нагрева, что стимулируют химический синтез и наноструктурирование поверхности. Одновременно физические эффекты, такие как фрагментация частиц и увеличение площади поверхности, наряду с химическими процессами, стимулируемыми образующимися при sonoлизе гидроксильными радикалами, в совокупности обеспечивают эффективное и контролируемое производство наноструктурированного гидроксида магния на поверхности магниевых сплавов для коррозионной устойчивости.

Для этого в 100 мл 1 масс. % суспензии металлического магния в деионизованной воде подвергали обработке ультразвуком в ледяной бане с использованием аппарата UIP1000hd (Hielscher, Германия), работающего на частоте 20 кГц с максимальной выходной мощностью 1000 Вт, ультразвукового излучателя BS4d40, площадь рабочей поверхности соноэлектрода составляла 12,5 см<sup>2</sup>. Проводили ультразвуковую обработку по времени 5, 12,5 и 20 минут при амплитудах 20, 60, 80 %. Полученные образцы высушивали при 37°C в течение 24 ч.

Для изучения фазового состава образцов использовали метод рентгенофазового анализа (РФА). Съёмку дифрактограмм проводили на дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Германия) с монохроматическим излучением  $CuK\alpha$  ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) в диапазоне  $2\theta$  от 20 до 80°. Степень коррозионной устойчивости оценивали с помощью электрохимической

импедансной спектроскопии при линейной развертке потенциала на потенциостат-гальваностате PalmSens4 (PalmSens, Нидерланды).

Электрохимические тесты проводили в 3,5% растворе NaCl в трехэлектродной ячейке, предварительно спрессованный в таблетку магний выступал в качестве рабочего электрода, в качестве электрода сравнения и противоэлектрода использовали хлорсеребряный электрод Ag/AgCl и платиновую проволоку соответственно.

Согласно данным рентгенофазового анализа, в образцах идентифицирована только фаза чистого магния; наличие каких-либо других фаз не зафиксировано. Результаты электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) демонстрируют, что ультразвуковая обработка приводит к увеличению сопротивления всех исследуемых образцов по сравнению с исходным материалом. На представленных спектрах это проявляется в смещении кривых импеданса в область более высокого сопротивления для всех модифицированных образцов относительно контроля. Кроме того, наличие характерного «крюка» в низкочастотной области на наличие индуктивной составляющей в импедансе, которая может быть связана с адсорбцией продуктов коррозии или особенностями кинетики на границе раздела фаз.

### **Выводы**

На основании данных линейной развертки потенциала, выявлено, что для серии образцов, обработанных с амплитудой 60% и 80%, наблюдается уменьшение плотности тока, что подтверждает улучшение коррозионной устойчивости. Таким образом, можно предположить, что ультразвуковая обработка может способствовать получению покрытий с замедленной коррозией, что представляет интерес в области разработки биорезорбируемых имплантатов.

### **Литература**

1. Zhai Y. et al. Research progress of metal-based additive manufacturing in medical implants // *Reviews on Advanced Materials Science*. — 2023. — Vol. 62, no. 1. — P. 20230148.
2. Seetharaman S., Sankaranarayanan D., Gupta M. Magnesium-based temporary implants: potential, current status, applications, and challenges // *Journal of Functional Biomaterials*. — 2023. — Vol. 14, no. 6. — P. 324.
3. Aikin M. et al. Recent advances in biodegradable magnesium alloys for medical implants: evolution, innovations, and clinical translation // *Crystals*. — 2025. — Vol. 15, no. 8. — P. 671.
4. Skorb E. V. et al. Sonochemical formation of metal sponges // *Nanoscale*. — 2011. — Vol. 3, no. 3. — P. 985-993.