

УДК 620.197

**А.Л. Желудкевич<sup>1</sup>, С.А. Карпушенков<sup>1,2</sup>, Л.С. Карпушенкова<sup>1,2</sup>,  
А.В. Коновалова<sup>1</sup>, О.В. Игнатенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет  
Минск, Беларусь

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СПЛАВЕ МАГНИЯ AZ31 ЧАСТИЦАМИ h-BN**

*Аннотация.* В данной работе для получения покрытий с большей износостойкостью в условиях плазменно-электролитического оксидирования на поверхности магниевого сплава AZ31 использовали водно-щелочной фосфатный электролит с добавкой порошка частиц гексагонального нитрида бора (h-BN).

**A.L. Zhaludkevich<sup>1</sup>, S.A. Karpushenkov<sup>1,2</sup>, L.S. Karpushenkava<sup>1,2</sup>,  
A.V. Kanavalava<sup>1</sup>, O.V. Ignatenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> SSPA "Scientific and practical materials research center of National  
academy of Science of Belarus

<sup>2</sup> Belarusian State University  
Minsk, Belarus

## **INCREASING WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE COATINGS ON AZ31 MAGNESIUM ALLOY WITH h-BN PARTICLES**

*Abstract.* In this work, to obtain coatings with greater wear resistance under plasma electrolytic oxidation conditions on the surface of the AZ31 magnesium alloy, an aqueous-alkaline phosphate electrolyte with the addition of hexagonal boron nitride (h-BN) particle powder was used.

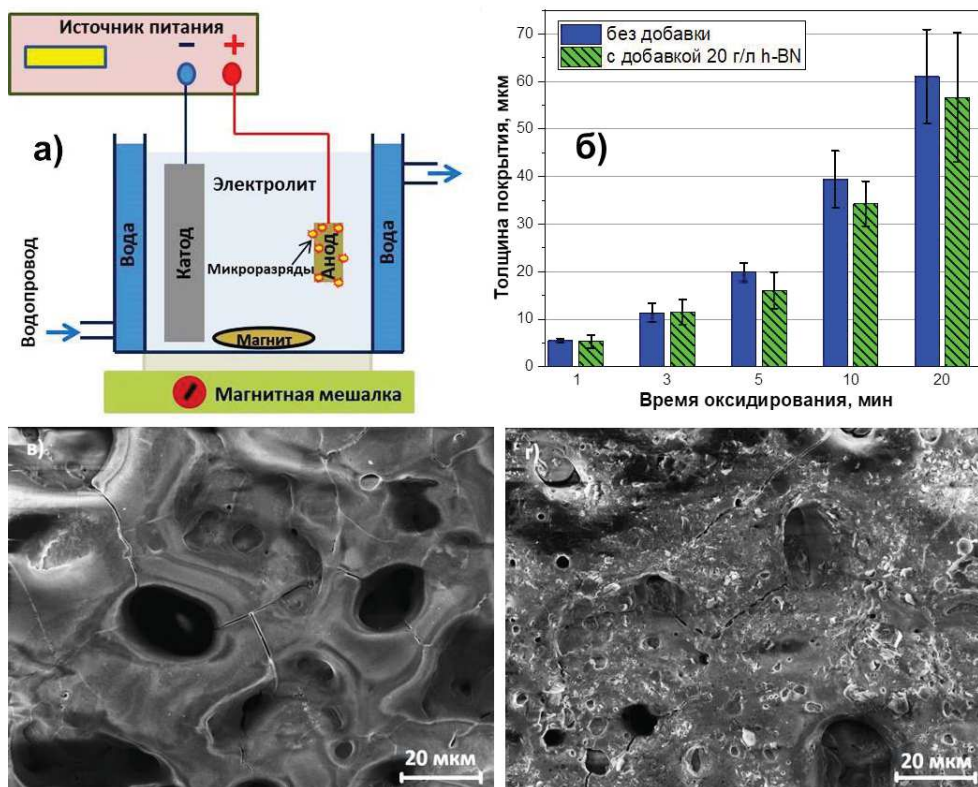
Интерес к магниевым сплавам, благодаря их низкой плотности, высокой электропроводности, нетоксичности, удельной жесткости и хорошим литейным свойствам определяет их использование в качестве перспективных материалов в медицине, автомобилестроении, аэрокосмических и других приложениях [1]. В промышленности хорошо зарекомендовали себя сплавы магния с цинком (AZ), которые обладают высокой пластичностью и хорошей прочностью, но основным их недостатком является низкая износостойкость и подверженность коррозионному разрушению [2]. Метод плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО), применяемый для формирования оксидно-композитных покрытий на поверхности легких металлов и их сплавов (Al, Mg и др.) является относительно новым и

очень перспективным, так как процесс оксидирования осуществляется в водных экологически безопасных растворах электролитов на основе фосфатов, силикатов и алюминатов [3]. Во время проведения ПЭО процесса при высоких напряжениях оксидирования (300-600 В) создаются условия возникновения кратковременных искровых микрозарядов с высокой температурой внутри. Последнее приводит к формированию на поверхности обрабатываемого сплава пористых композитных покрытий, содержащих высокотемпературные оксидные фазы из элементов оксидируемого сплава и компонентов электролита, даже если они находятся в растворе в виде твердых частиц [1,2]. Использование *in situ* в электролитах твердых нано- или микро-частиц разного типа, таких как порошки TiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. приводит к их внедрению в структуру покрытия во время ПЭО обработки, что влияет на морфологию, пористость и износостойкость формируемого композитного покрытия [2,3]. Одной из таких перспективных добавок является порошок гексагонального нитрида бора (h-BN) [4].

Целью данной работы являлось исследование влияния добавки частиц гексагонального нитрида бора (h-BN) на морфологию, состав и износостойкость композитных покрытий, полученных в водно-щелочном фосфатном электролите в условиях плазменно-электролитической обработки магниевого сплава AZ31.

Образцы магниевого сплава AZ31 размером 30x20x1.5 мм перед оксидированием механически зачищали от загрязнений и естественной оксидной пленки шлифовальной бумагой (зернистостью от 500 до 2500), протирали этиловым спиртом и сушили на воздухе. В качестве катода использовали стальную пластину. ПЭО обработку проводили с использованием источника постоянного тока в стеклянной ячейке объемом 1 л в водном электролите (рис. 1а), содержащем 2 г/л КОН и 10 г/л Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> с добавлением 20 г/л нанокристаллического порошка h-BN. Время оксидирования варьировали от 1 до 20 мин при установленном максимальном напряжении оксидирования 550 В и плотности тока 50 мА/см<sup>2</sup>. Соотношение времени импульсов протекающего тока (включено/выключено, мс) составляло  $t_{on}:t_{off} = 1:9$ .

Из рис. 1б видно, что после 3-х минут ПЭО обработки, когда на поверхности обрабатываемого сплава наблюдаются микрозаряды малого и большого размера, но микродугои еще не появляются [3] в случае электролита с добавкой частиц h-BN происходит замедление роста толщины покрытия. Последнее обусловлено наличием инкорпорированных в формируемом композитном покрытии частиц h-BN, которые проявляют диэлектрические свойства и заполняют поры формируемого оксидного покрытия (рис. 1в,г).

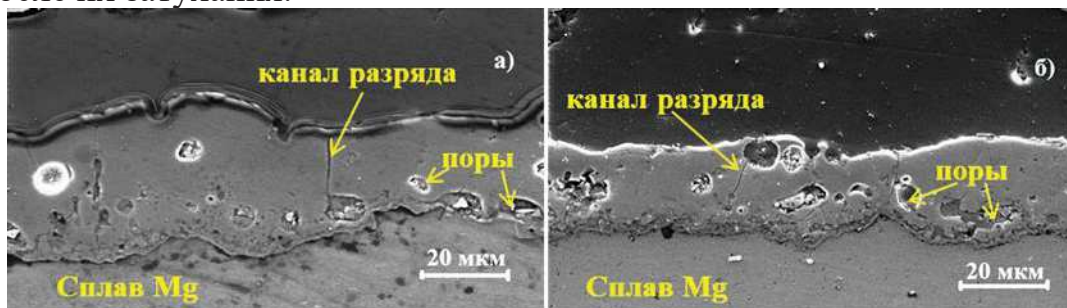


**Рис. 1 -** Схема установки для ПЭО обработки (а); зависимость изменения толщины покрытия (б) от времени оксидирования; морфология поверхности ПЭО-покрытий, полученных в течение 10 мин без (в) и с добавкой h-BN (г).

Согласно литературным данным [2], инкорпорирование частиц h-BN в структуру композитного покрытия происходит по инертному механизму, когда частицы h-BN, прилипшие к поверхности, постепенно обволакиваются формируемым оксидно-фосфатным слоем. Рентгенофазовый анализ покрытий сформированных в базовом электролите и электролите с добавкой h-BN в обоих случаях показал типичный фазовый состав из кристаллических структур MgO и Mg<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Из-за малого размера частиц h-BN и их инертного внедрения в пористую структуру ПЭО слоя они не обнаруживаются в виде кристаллических фаз и являются рентгеноаморфными.

На рис. 2 приведены поперечные сечения композитных покрытий, полученных после 10 мин ПЭО-обработки в стандартном электролите и с добавлением частиц h-BN. Микрофотографии для обоих условий синтеза показывают, что покрытия по толщине можно разделить на две области, состоящие из основного покрытия и граничащего с металлической подложкой плотного барьерного слоя толщиной около 1–2 мкм. В структуре основного покрытия в обоих случаях наблюдаются характерные горизонтальные и сферические

поры и каналы, оставшиеся в местах последних пробоев искровых разрядов. Толщина покрытий неравномерна, что обусловлено механизмом проведения ПЭО процесса путем последовательного возникновения микроарядов с последующим оплавлением продуктов после их затухания.



**Рис. 2 - Микрофотографии поперечных сечений ПЭО покрытий, полученных в базовом электролите (а) и в электролите с добавкой 20 г/л h-BN в течение 10 мин.**

Согласно данным энергодисперсионного анализа, все полученные покрытия содержат элементы сплава и компонентов электролита: Mg, Al, O, P, Si, K и Na. О содержании в покрытиях частиц h-BN можно судить по наличию азота. Так, в покрытиях, полученных в электролите без добавки частиц, фоновое содержание азота не превышает 2 масс. %, а в покрытиях, полученных в электролите с добавкой частиц h-BN, содержание азота составляло от 6 (5 мин оксидирования) до 10 масс. % (20 мин оксидирования). При этом для покрытий, сформированных в течение 1 мин ПЭО обработки, содержание азота в покрытиях, как в базовом электролите, так и электролите без добавки, практически не отличалось, так как мелкие микроаряды не способствуют внедрению частиц h-BN.

В данной работе проведено сравнительное исследование износостойкости полученных покрытий при истирании стальным шариком с целью определения максимальной нагрузки, необходимой для их истирания до поверхности магниевого сплава (таблица). Испытание магниевого сплава без ПЭО покрытия показало, что стальной шарик начинает интенсивно истирать поверхность даже при минимальной нагрузке в 1 Н и образуется глубокая колея трека.

В таблице приведены данные износостойкости ПЭО покрытий, полученных в базовом электролите без и с добавкой частиц h-BN. При всех временах оксидирования расчетные значения скорости износа партнера статического трения  $W_k$  для ПЭО покрытий с добавкой h-BN меньше, чем для покрытий без частиц h-BN. Также на лучшую износостойкость указывают и значения коэффициента трения, которые значительно больше для ПЭО покрытий с добавкой h-BN.



**Таблица -Параметры испытания на износ при максимальных нагрузках для ПЭО покрытий на магниевом сплаве AZ31, полученных с добавкой h-BN и в базовом электролите в течение 5, 10 и 20 мин ПЭО обработки**

Образец	Время ПЭО обработки, мин	Нагрузка, Н	Средний диаметр истирания шара, мкм	Средняя ширина трека истирания, мкм	Значение коэффициента истирания (f)			Скорость износа партнера статического трения $W_k$ , $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$
					мин	макс	среднее	
ПЭО	5	6	1007,2	1098,1	0,250	0,669	0,331	2,3589e-04
ПЭО+hBN	5	6	856,7	945,6	0,247	0,617	0,498	1,2341e-04
ПЭО	10	7	1237,0	1085,4	0,124	0,715	0,407	4,6253e-04
ПЭО+hBN	10	7	989,3	925,2	0,293	0,631	0,506	1,8806e-04
ПЭО	20	9	1275,0	1115,4	0,109	0,680	0,398	3,6582e-04
ПЭО+hBN	20	9	827,0	809,1	0,267	0,633	0,549	1,2889e-04

Таким образом, можно утверждать, что с увеличением времени ПЭО обработки износостойкость покрытий увеличивается, что подтверждается необходимостью приложения более высокой нагрузки (6 Н для 5 мин, 7 Н для 10 мин и 9 Н для 20 мин ПЭО обработки) для истирания покрытия с частицами h-BN. Изменения коэффициента трения показывают, что ПЭО покрытия, полученные в базовом электролите при таких же нагрузках разрушались уже 1-2 мин. Испытания покрытий на износостойкость показало, что инкорпорированные частицы h-BN позволяют значительно увеличить износостойкость как магниевое сплава так и ПЭО покрытий, полученных на поверхности сплава в базовом электролите.

***Благодарность.** Работа выполнена в рамках задания ГПНИ на 2021-2025 годы «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)), задания 2.4.2 «Исследование процессов формирования и характеристик покрытий, полученных методом плазменно-электролитического оксидирования с наноструктурами».*

#### **Список использованных источников**

1. Buling A., Zerrer J. Surface and Coating Technology. 2019. Vol. 369. P.142 – 155.
2. Molaei M., Babaei K., Fattah-alhosseini A. Journal of Magnesium and Alloys. 2021. Vol. 9. P.1164 – 1186.
3. Lu X., Blawert C., Scharnagl N., Kainer K. U. Journal of Magnesium and Alloys. 2013. Vol. 1. № 4. P.267 – 274.
4. Sun X., Zhang J., Pan W., Wang W., Tang C. Ceramics International. 2023. Vol. 49. P. 24 – 39.