

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-2-39-46>

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ h-BN, НА МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ AZ31

© Александр Ларионович Желудкевич^{1*}, Сергей Александрович Карпушенков^{1,2*}, Лариса Степановна Карпушенкова^{1,2}, Александра Владимировна Коновалова¹, Олег Владимирович Игнатенко¹, Татьяна Васильевна Шёлковая¹

¹ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 19; *e-mail: zheludkevich27@gmail.com

² Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, 220030, г. Минск, пр-т Независимости, д. 4; *e-mail: karpushenkov@bsu.by

Статья поступила 12 сентября 2023 г. Поступила после доработки 16 сентября 2023 г. Принята к публикации 20 декабря 2023 г.

Существенный недостаток сплавов на основе магния, широко применяемых в промышленности, — низкая износостойкость. В работе представлены результаты плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) для получения покрытий с большей износостойкостью на поверхности магниевого сплава AZ31. ПЭО проводили в водно-щелочном фосфатном электролите с добавлением порошка частиц гексагонального нитрида бора (h-BN). Метод ПЭО — один из наиболее перспективных для поверхностной обработки магниевых сплавов, так как оксидирование проводится в щелочных алюминатных, силикатных или фосфатных электролитах с различными функциональными добавками. Добавка нанокристаллического порошка гексагонального h-BN в виде суспензии в объем электролита не оказывает влияния на электрические параметры ПЭО, а частицы h-BN инкорпорируются в структуру формируемого композитного покрытия, повышая его износостойкость. Показано, что получаемые покрытия обладают типичным для ПЭО рельефом с развитой морфологией и пористостью, которые меняются в зависимости от времени оксидирования. При этом инкорпорирование частиц h-BN в покрытие происходит по инертному механизму, поскольку они не претерпевают химических превращений с образованием новых фаз. Композиционные покрытия, полученные на поверхности магниевого сплава AZ31 методом ПЭО, состоят из кристаллических фаз MgO и Mg₃(PO₄)₂ независимо от добавления в электролит частиц h-BN. Износостойкость покрытий в сравнении с необработанным сплавом выше в 6–8 раз. Полученные результаты могут быть использованы при получении ПЭО-покрытий с повышенной износостойкостью и применении их в различных отраслях экономики.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование; композиционное покрытие; магниевый сплав AZ31; гексагональный нитрид бора; износостойкость.

STUDY OF THE WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE COATINGS MODIFIED WITH h-BN PARTICLES ON AZ31 MAGNESIUM ALLOY

© Aliaksandr L. Zheludkevich,^{1*} Sergey A. Karpushenkov,^{1,2*} Larisa S. Karpushenkava,^{1,2} Alexandra V. Konovalova,¹ Oleg V. Ignatenko,¹ Tatsiana V. Shoukavaya¹

¹ Scientific and Practical Material Research Center, National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovki vul. 19, Minsk, 220072, Republic of Belarus; *e-mail: zheludkevich27@gmail.com

² Belarusian State University, Nezavisimosti prosp. 4, Minsk, 220030, Republic of Belarus; *e-mail: karpushenkov@bsu.by

Received September 12, 2023. Revised September 16, 2023. Accepted December 20, 2023.

A low wear resistance is a significant disadvantage of magnesium-based alloys widely used in industry. The results of plasma electrolytic oxidation (PEO) carried out in an aqueous-alkaline phosphate electrolyte with the addition of hexagonal boron nitride (h-BN) powder to obtain coatings with greater wear resistance on the surface of AZ31 magnesium alloy are presented. The PEO method is one of the most promising for surface treatment of magnesium alloys, since oxidation is carried out in alkaline aluminate, silicate or phosphate electrolytes with various functional additives. The addition of nanocrystalline hexagonal h-BN powder in the form of a suspension into the electrolyte volume does not affect the electrical

parameters of PEO, and h-BN particles are incorporated into the structure of the formed composite coating, increasing the wear resistance. It is shown that the resulting coatings have a relief typical of PEO with developed morphology and porosity, which change depending on the oxidation time. In this case, the incorporation of h-BN particles into the coating occurs by an inert mechanism, since they do not undergo chemical transformations with the formation of new phases. Composite coatings obtained on the surface of the AZ31 magnesium alloy by the PEO method consist of crystalline phases of MgO and $Mg_3(PO_4)_2$, regardless of the addition of h-BN particles to the electrolyte. The wear resistance of coatings is 6–8 times higher compared to the untreated alloy. The results obtained can be used to produce PEO coatings with increased wear resistance and use them in various sectors of the economy.

Keywords: plasma electrolytic oxidation; composite coating; magnesium alloy AZ31; hexagonal boron nitride; wear resistance.

Введение

Магниевые сплавы благодаря своей низкой плотности, высокой электропроводности, нетоксичности, удельной жесткости и хорошим литейным свойствам широко используют в медицине, автомобилестроении, аэрокосмической отрасли и др. [1]. В промышленности хорошо зарекомендовали себя сплавы магния с цинком (AZ), которые вследствие присутствия цинка обладают высокой пластичностью и прочностью [2]. Основным недостатком таких сплавов — низкая износостойкость и подверженность коррозии, что ограничивает их возможные области применения [2, 3]. Для улучшения износостойкости и стойкости к коррозии поверхность магниевых сплавов покрывают защитными покрытиями, используя методы плазменного напыления, газофазного осаждения, химического и электрохимического конверсионного осаждения, а также анодирования и плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) [1–10].

При ПЭО синтез покрытий осуществляют в водных экологически безопасных растворах электролитов на основе фосфатов, силикатов и алюминатов [10–14]. Суть метода заключается в том, что на поверхности легких металлов и их сплавов (Al, Mg, Ti и др.), способных формировать оксидную пленку вентильного типа с униполярной проводимостью, при высоких напряжениях оксидирования (300–600 В) создаются условия возникновения кратковременных искровых микрозарядов с высокой температурой внутри. Возникновение искровых разрядов 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, 15].

Использование *in situ* в электролитах твердых нано- или микрочастиц разного типа (порошки TiO_2 , TiN, Si_3N_4 , Al_2O_3 , SiC, SiO_2) приводит к их внедрению в структуру покрытия во время ПЭО-обработки, что влияет на морфологию, пористость и износостойкость конечного

композитного покрытия [2, 11, 16, 17]. Так, было зафиксировано, что износостойкость, например, титанового сплава повышалась при формировании на его поверхности композитных покрытий с включениями частиц гексагонального нитрида бора в условиях ПЭО-обработки [18, 19].

Цель работы — исследование влияния добавки порошка нанокристаллического гексагонального нитрида бора (h-BN) на морфологию, состав и износостойкость композитных покрытий, полученных в водно-щелочном фосфатном электролите в условиях ПЭО-обработки магниевых сплавов AZ31.

Материалы, методика, оборудование

Образцы для ПЭО-обработки (аноды) размером $30 \times 20 \times 1,5$ мм вырезали из цельного листа магниевых сплавов AZ31 (номинальный состав сплава, % масс.: Al — 3,04, Zn — 1,0, Mn — 0,27, Si — 0,02, Fe — 0,0028, Cu — 0,0008, Mg — остальное). Перед оксидированием образцы механически последовательно зачищали от загрязнений и естественной оксидной пленки шлифовальной бумагой зернистостью 500, 800, 1200 и 2500, протирали этиловым спиртом и сушили на воздухе. В качестве катода использовали стальную пластину. Соотношение площадей катода и анода составляло 15:1.

ПЭО-обработку проводили в стеклянной ячейке объемом 1 л в водном электролите, содержащем 2 г/л KOH и 10 г/л Na_3PO_4 с добавлением 20 г/л порошка h-BN (ТУ У 26.8-00222226-007-2003). Величина pH электролита составляла $13,3 \pm 0,5$. В течение ПЭО-обработки температуру электролита поддерживали на уровне 20 ± 5 °C с помощью постоянного перемешивания и охлаждения ячейки проточной холодной водой. Время оксидирования варьировали от 1 до 20 мин при установленном максимальном напряжении оксидирования 550 В и плотности тока 50 мА/см². Соотношение времени импульсов протекающего тока (включено/выключено) составляло $t_{on}:t_{off} = 1:9$. Для оксидирования использовали лабораторный источник питания постоянного тока EA-PSI 9750-12 2U (EA Electro-Automatic, Ger-

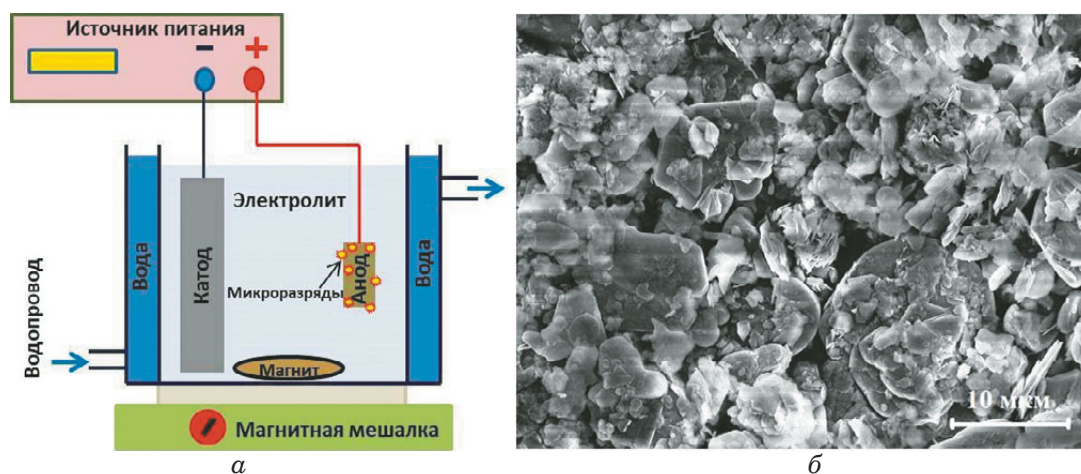


Рис. 1. Схема установки для ПЭО-обработки (а) и частицы порошка h-BN (б)

Fig. 1. Scheme of the installation for PEO processing (a) and h-BN particles (b)

manу), снабженный функцией программного генерирования импульсов тока. Схема установки и вид частиц порошка h-BN приведены на рис. 1.

Морфологию и элементный анализ поверхности и поперечного сечения полученных ПЭО-покрытий исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega3 SB (Чехия), оснащенного приставкой с энергодисперсионным рентгеновским излучением. Для исследования поперечного сечения покрытий образцы сначала заливали эпоксидной смолой, а затем шлифовали. Для окончательной полировки использовали спрей, содержащий алмазные частицы размером 1 мкм.

Фазовый состав покрытий определяли методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance (CuK α -излучение, никелевый фильтр, диапазон сканирования — 10 – 80°, шаг — 0,02°, время выдержки — 2 с).

Износостойкость изучали с помощью осцилляционного триботестера Tribotec AB (Франция). В качестве партнера статического трения при сухом скольжении использовался стальной шарик (сталь марки AISI 52100, диаметр — 6 мм). Во время испытания на износ температуру и относительную влажность в камере триботестера поддерживали на уровне 25 ± 2 °C и 40 ± 2 % соответственно. Прилагаемые нагрузки варьировали от 1 до 9 Н в зависимости от исследуемого образца, чтобы определить максимальное значение нагрузки, при котором покрытие истирается до основания сплава. Для каждого испытания использовали новый стальной шарик, который предварительно очищали этиловым спиртом от возможных загрязнений и сушили сжатым воздухом. Триботестер работал в колебательном режиме (амплитуда колебаний стального шарика (один путь сухого скольжения по поверхности) —

10 мм, скорость скольжения — 5 мм/с) [20]. Время испытания для каждого опыта составляло 2400 с, что соответствовало 12 м пути скольжения шарика (ASTM G 133-02). Диаметр истирания стальных шариков и ширину треков истирания на покрытии определяли с помощью оптического микроскопа ($\times 40$). Полученные данные использовали для расчета скорости износа партнера статического трения с помощью программного обеспечения для триботестера.

Обсуждение результатов

ПЭО-обработку проводили при постоянной плотности тока 50 мА/см². В данных условиях с ростом толщины покрытия увеличивается напряжение окисления. На рис. 2 приведены зависимости напряжения окисления и толщины покрытий от времени ПЭО-обработки в базовом фосфатном электролите и в электролите с добавкой 20 г/л h-BN.

По виду и характеру возникающих микроударов на поверхности окисляемого магниевых сплава во время ПЭО-обработки можно выделить следующие стадии формирования композитного покрытия (см. рис. 2): I — стадия обычного анодирования с резким ростом значения напряжения и формированием начального плотного оксидного слоя барьерного типа толщиной 1 – 2 мкм; II — появление свечения и очень мелкого искрения на поверхности (время горения искр определяется несколькими миллисекундами); III — некоторые искры преобразуются в более крупные микроудары белого цвета, при этом наблюдаются и мелкие искры; IV — крупные микроудары белого цвета становятся желтыми; V — желтые микроудары преобразуются в долго горящие (в течение нескольких секунд)

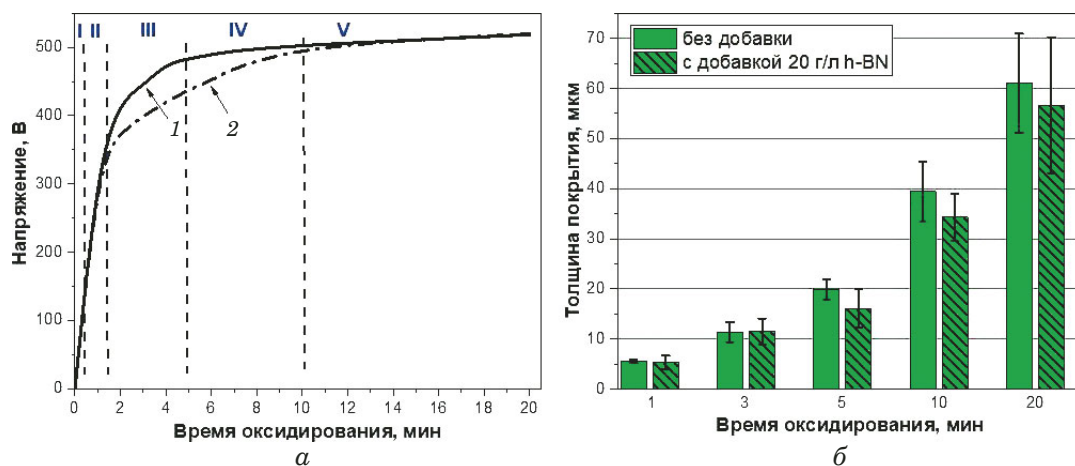


Рис. 2. Зависимости напряжения (*a*) и толщины покрытия (*б*) от времени окислирования в электролите с добавкой 20 г/л нанокристаллического порошка h-BN (1) и в базовом фосфатном электролите без добавки (2)

Fig. 2. Dependences of the voltage (*a*) and the coating thickness (*b*) on the oxidation time in the electrolyte with the addition of 20 g/liter of h-BN nanocrystalline powder (1) and in the base phosphate electrolyte without any additive (2)

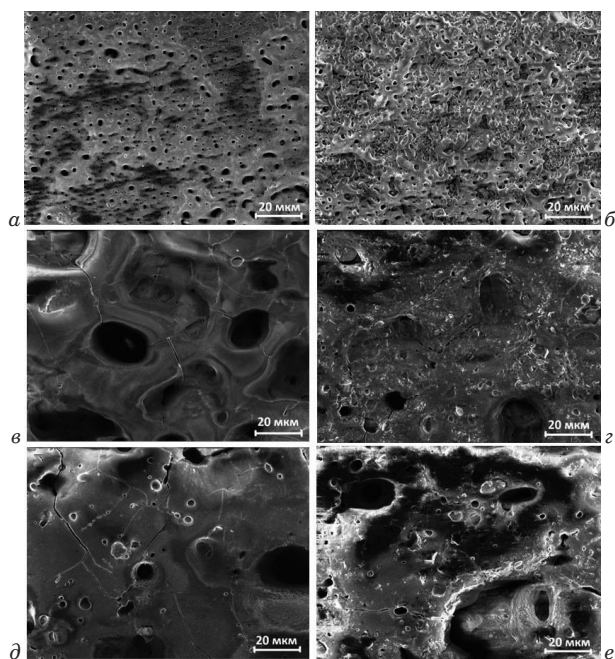


Рис. 3. Морфология поверхности ПЭО-покрытий, полученных без (*a, в, д*) и с добавкой h-BN (*б, г, е*) при времени ПЭО-обработки 1 (*a, б*), 10 (*в, г*) и 20 мин (*д, е*)

Fig. 3. Surface morphology of PEO coatings produced without (*a, c, e*) and with h-BN addition (*b, d, f*) at a different duration of PEO treatment 1 (*a, b*), 10 (*c, d*), and 20 min (*e, f*)

на одном месте микродуги, при этом количество мелких микропор резко уменьшается.

Заметим, что характер и режимы наблюдаемых микропор, как в базовом фосфатном электролите, так и в электролите с добавкой нанокристаллических частиц h-BN, идентичны.

На рис. 3 представлены общий вид морфологии поверхности и размеры пор в покрытиях, полученных при разном времени окислирования.

Для покрытий, сформированных в течение 1 мин окислирования, практически не имеется различий в морфологии поверхности, размере (0,5 – 2 мкм) и количестве пор. Различия наблюдаются при более длительном времени ПЭО-обработки, когда создаются условия для формирования более крупных микропор, что приводит к образованию некоторых пор диаметром 5 – 10, а в местах микродуг — до 20 мкм. В покрытиях, полученных с добавкой частиц h-BN при времени обработки 10 и 20 мин, визуально видны включения частиц, которые не наблюдаются для покрытий, полученных в электролите без добавки.

Зависимости напряжения от времени ПЭО-обработки (см. рис. 2) показывают, что на III и IV стадиях окислирования для электролита с добавкой частиц h-BN значения напряжения немного выше. Это можно объяснить более высокими диэлектрическими свойствами формируемого композитного покрытия вследствие инкорпорирования диэлектрически нейтральных частиц нитрида бора в его структуру и поры. В начале окислирования кривые зависимостей совпадают, поскольку на стадии I происходит только обычное анодирование, а на стадии II возникают микропоры только малой величины, что не позволяет интенсивно вовлекать частицы нитрида бора в структуру покрытия. На последней стадии V, когда появляются долго горящие микродуги, основной ток проходит через них, и зависимости напряжения от времени снова практически не отличаются для обоих электролитов. При этом количество микропор снижается в несколько раз, а мелкие белые искры полностью исчезают.

Наличие больших микродуг приводит к локальному разрушению оксидно-композитного слоя покрытия, поэтому наиболее оптимальное

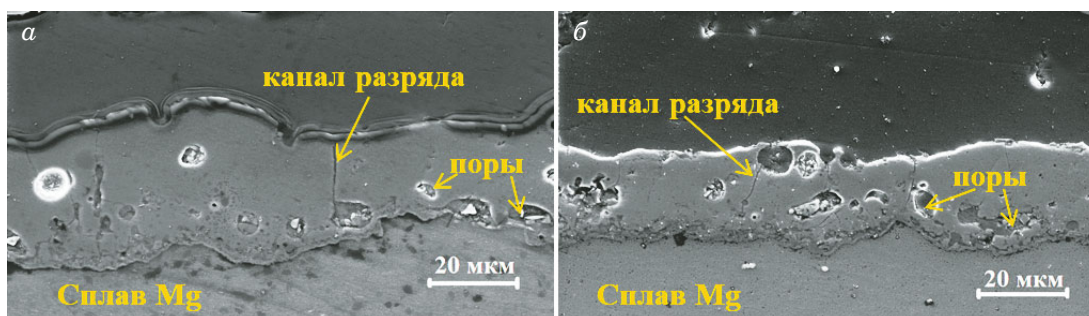


Рис. 4. Поперечные сечения ПЭО-покрытий, полученных в базовом электролите (а) и в электролите с добавкой 20 г/л h-BN (б)

Fig. 4. Cross-sections of PEO coatings obtained in the base electrolyte (a) and in the electrolyte added with 20 g/liter h-BN (b)

время оксидирования составляет 5 – 10 мин, когда происходит активное инкорпорирование частиц h-BN в структуру покрытия. При этом скорость роста композитного покрытия замедляется как из-за диэлектрических свойств самих частиц h-BN, так и за счет уменьшения открытой пористости.

Инкорпорирование частиц h-BN в структуру композитного покрытия происходит по инертному механизму, когда прилипшие частицы постепенно обволакиваются формируемым оксидно-фосфатным слоем [2]. В случае реактивного механизма наблюдается взаимодействие частиц с компонентами подложки и электролита с образованием новых кристаллических фаз, при этом вид микроразрядов во время оксидирования меняется [17]. Рентгенофазовый анализ в обоих случаях показал типичный для ПЭО-покрытий фазовый состав из кристаллических структур MgO и $Mg_3(PO_4)_2$. Вследствие малого размера частиц h-BN и их инертного внедрения в пористую структуру оксидного слоя они не обнаруживаются в виде кристаллических фаз и являются рентгеноаморфными.

На рис. 4 приведены поперечные сечения композитных покрытий, полученных после 10 мин ПЭО-обработки в стандартном электролите и с добавлением частиц h-BN. Видно, что покрытия по толщине можно разделить на две области, состоящие из основного покрытия и граничащего с металлической подложкой плотного пограничного 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 образования ПЭО-покрытий путем последовательного возникновения микроразрядов с последующим оплавлением продуктов после их затухания.

Согласно данным энергодисперсионного анализа (EDS), полученные покрытия содержат

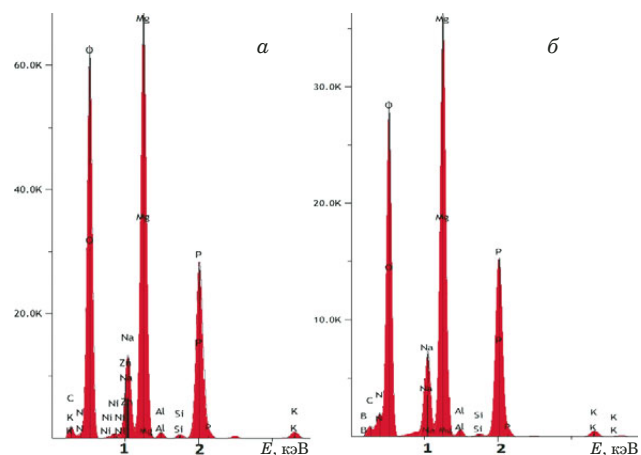


Рис. 5. EDS-спектры для ПЭО-покрытий, полученных в течение 10 мин в базовом электролите (а) и в электролите с добавкой 20 г/л h-BN (б)

Fig. 5. EDS spectra for PEO coatings obtained within 10 min in the base electrolyte (a) and in the electrolyte added with 20 g/liter h-BN (b)

элементы сплава и компонентов электролита (Mg, Al, O, P, Si, K, Na) (рис. 5). О содержании в покрытиях частиц h-BN можно судить по наличию азота. Так, в покрытиях, полученных в обоих электролитах, фоновое содержание азота составляло <2 и от 6 (5 мин оксидирования) до 10 % масс. (20 мин оксидирования) соответственно. При этом для покрытий, сформированных в течение 1 мин ПЭО-обработки, содержание азота в покрытиях, как в базовом электролите, так и электролите с добавкой, практически не отличалось.

При большем увеличении на поверхности покрытия прослеживаются инкорпорированные частицы (рис. 6). Локальный элементный анализ по отдельным наиболее крупным (около 5 мкм) частицам показал содержание азота в них 49 – 56 % масс. Учитывая, что на молекулу BN по массе приходится 43,5 % атомов B и 56,5 % атомов N, можно говорить, что частицы BN не претерпели химического преобразования и находятся в

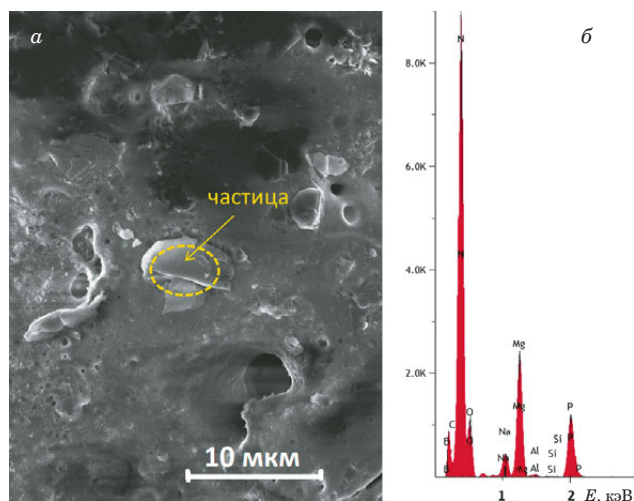


Рис. 6. ПЭО-покрытие, полученное в течение 10 мин ПЭО-обработки, с инкорпорированными частицами h-BN (а) и EDS-спектр для поверхности этого покрытия (б)

Fig. 6. PEO coating obtained during 10 min of PEO treatment with incorporated h-BN particles (a) and EDS spectrum for the surface of this coating (b)

структуре композитного ПЭО-покрытия в виде включений.

Для определения максимальной нагрузки, необходимой для истирания покрытий до поверхности магниевого сплава, проводили сравнительное исследование их износостойкости при истирании стальным шариком. Максимальную нагрузку, которую выдерживает при истирании покрытие, определяли путем постепенного увеличения нагрузки на стальной шарик [16].

На рис. 7 для ПЭО-покрытия, полученного в течение 10 мин в электролите с добавлением нанокристаллического порошка h-BN, показан типичный вид треков истирания на покрытии и поверхности стального шарика при различных нагрузках. Видно, что ПЭО-покрытие при нагрузке 5 Н не протерлось, и на его поверхности видны абразивные отложения от стального шарика (окисленные продукты железа). При дальнейшем увеличении нагрузки до 7 Н протертость

также не наблюдается, однако в центре трека истирания прослеживается характерное углубление, что свидетельствует о частичном истирании покрытия. При 9 Н трек истирания показывает, что ПЭО-покрытие не выдерживает нагрузки — шарик начинает истирать уже само основание магниевого сплава. При этом частицы разрушенного покрытия попадают в область истирания шарика о поверхность покрытия, что сказывается на неравномерности истирания стального шарика.

Сравнительное испытание магниевого сплава без ПЭО-покрытия показало, что стальной шарик начинает интенсивно истирать поверхность при минимальной нагрузке в 1 Н, образуется глубокая колея, что приводит к автоматической остановке испытания.

В таблице приведены результаты испытаний на износостойкость покрытий, полученных с добавлением нанокристаллического порошка h-BN, с указанием максимальных нагрузок в зависимости от времени оксидирования, при которых покрытия не истирались до основания магниевого сплава. Для сравнения приведены данные для покрытий, полученных в базовом электролите без добавки h-BN, которые при таких же нагрузках протирались до основания сплава. Выявили, что при всех периодах оксидирования расчетная скорость износа партнера статического трения для ПЭО-покрытий с добавкой h-BN меньше, чем для покрытий, полученных в базовом электролите. При расчетах использовали значения ширины трека истирания и диаметра истирания стального шарика. О лучшей износостойкости свидетельствует также коэффициент трения, который значительно больше для ПЭО-покрытий с добавкой h-BN. Отметим, что коэффициент трения — дополнительная характеристика износостойкости. По его изменению можно судить о начале истирания или разрушении покрытия.

На рис. 8 представлены зависимости коэффициента трения от времени истирания стального шарика для покрытий, полученных при различ-

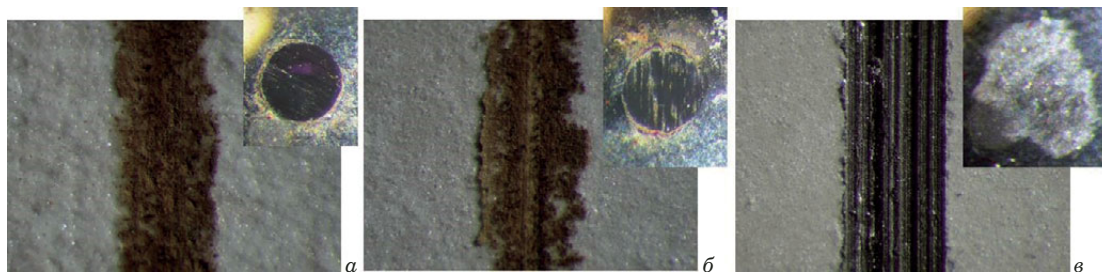


Рис. 7. Треки истирания на ПЭО-покрытии и поверхности стального шарика после проведения теста на износостойкость при нагрузках 5 (а), 7 (б) и 9 Н (в)

Fig. 7. Abrasion tracks on the PEO coating and the surface of the steel ball after the wear resistance test at different loads 5 (a), 7 (b), and 9 N (c)

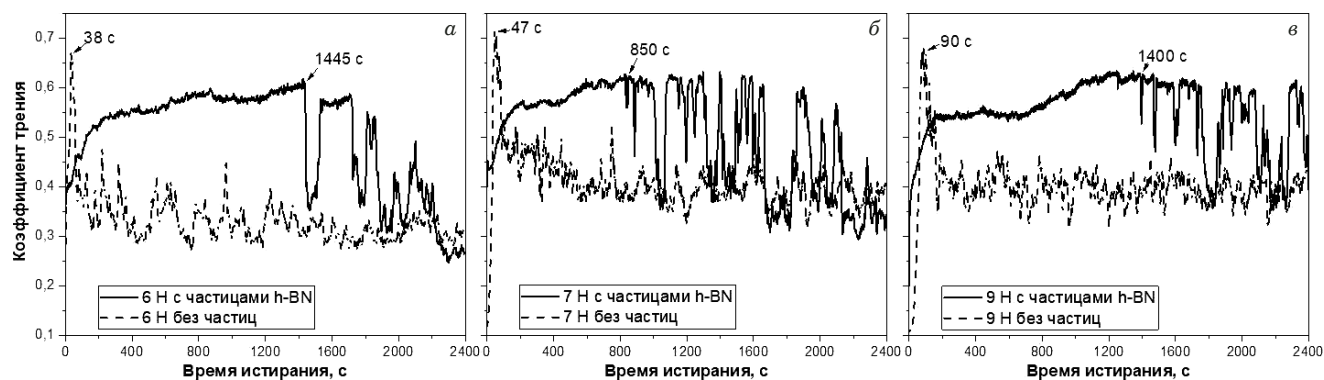


Рис. 8. Зависимости коэффициента трения от времени истирания стального шарика для покрытий, полученных при времени ПЭО-обработки 5 (а), 10 (б) и 20 мин (в) в электролитах с добавлением и без нанокристаллического порошка h-BN

Fig. 8. Dependences of the friction coefficient on the abrasion time of a steel ball for coatings obtained at a PEO treatment time of 5 (a), 10 (b), and 20 min (c) in electrolytes with and without the addition of h-BN nanocrystalline powder

ном времени ПЭО-обработки в электролитах с добавкой и без нанокристаллического порошка h-BN. Видно, что на начальном этапе истирания покрытия и стального шарика протекают равномерно. После определенного промежутка времени (1445, 850 и 1400 с при нагрузках 6, 7 и 9 Н соответственно) наблюдаются характерные флуктуации в зависимостях, которые обусловлены попаданием в зону истирания частиц от разрушенного верхнего слоя испытываемого покрытия, но при этом покрытия с добавкой h-BN выдерживают установленные нагрузки и до основания сплава не протираются. В случае ПЭО-покрытий, полученных в базовом электролите, при тех же нагрузках после 38 – 90 с (в зависимости от времени оксидирования) покрытия разрушаются до основания сплава, и зависимости показывают истирание стального шарика о поверхность магниевого сплава.

Можно утверждать, что с увеличением времени ПЭО-обработки износостойкость покрытий повышается. Это подтверждается необходимостью приложения более высокой нагрузки (6 Н для 5 мин, 7 Н для 10 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 тех же нагрузках разрушаются уже через 38 – 90 с. Следовательно, ПЭО-покрытия с инкорпорированными частицами h-BN существенно дополнительно повышают износостойкость сплава.

Закключение

Таким образом, проведенные исследования полученных на поверхности магниевого сплава AZ31 композитных ПЭО-покрытий с инкорпорированными в их структуру нанокристаллическими частицами h-BN показали, что частицы нитрида бора встраиваются в формируемое покрытие по инертному механизму, т.е. без изменения фазового состава и электрических параметров в течение ПЭО-обработки. Это подтверждается однотипным содержанием кристаллических фаз из MgO и Mg₃(PO₄)₂, морфологией поверхности и видом наблюдаемых микроразрядов во время оксидирования. Инкорпорированные частицы h-BN позволяют значительно повысить износостойкость магниевого сплава и ПЭО-покрытий,

Параметры испытания на износ при максимальных нагрузках для ПЭО-покрытий

Wear test parameters at maximum loads for PEO coatings

Образец	Время ПЭО-обработки, мин	Нагрузка, Н	Средний диаметр истирания шара, мкм	Средняя ширина трека истирания, мкм	Коэффициент истирания			Скорость износа партнера статического трения, мм ³ /(Н · м)
					мин	макс	среднее	
ПЭО	5	6	1007,2	1098,1	0,250	0,669	0,331	2,3589 · 10 ⁻⁴
ПЭО + h-BN			856,7	945,6	0,247	0,617	0,498	1,2341 · 10 ⁻⁴
ПЭО	10	7	1237,0	1085,4	0,124	0,715	0,407	4,6253 · 10 ⁻⁴
ПЭО + h-BN			989,3	925,2	0,293	0,631	0,506	1,8806 · 10 ⁻⁴
ПЭО	20	9	1275,0	1115,4	0,109	0,680	0,398	3,6582 · 10 ⁻⁴
ПЭО + h-BN			827,0	809,1	0,267	0,633	0,549	1,2889 · 10 ⁻⁴

полученных на поверхности сплава в базовом электролите. Синтез композитных покрытий на магниевом сплаве дает возможность значительно расширить области применения магниевых сплавов. Благодаря высокой износостойкости предлагаемые покрытия могут применяться, например, в транспортной отрасли при производстве деталей из магниевых сплавов, подвергающихся нагрузкам на истирание.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т22КИ-030) и в рамках государственной программы научных исследований на 2021 – 2025 гг. «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 окисления с наноструктурами» и «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия», задания 2.1.06.03 «Молекулярные сита на основе метастабильных оксидов для использования в катализе, нанокапсулировании, а также для создания систем — химических депо, функционирующих по механизму отрицательной обратной связи».

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Buling A., Zerrer J.** Increasing the application fields of magnesium by ultraceraic: Corrosion / *Surface and Coating Technology*. 2019. Vol. 369. P. 142 – 155. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
2. **Molaei M., Babaei K., Fattah-alhosseini A.** Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano- and micro-sized additives into the electrolytes: a review / *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9. P. 1164 – 1186. DOI: 10.1016/j.jma.2020.11.016
3. **Kulekci M. K.** Magnesium and its alloys applications in automotive industry / *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 39. N 9 – 10. P. 851 – 865. DOI: 10.1007/s00170-007-1279-2
4. **Meng L., Liu X., Liu L., et al.** Comparative Investigation of the Corrosion Behavior and Biocompatibility of the Different Chemical Conversion Coatings on the Magnesium Alloy Surfaces / *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 1644. DOI: 10.3390/met12101644
5. **Chino Y., Yamamoto A., Iwasaki H., et al.** Solid Recycling of an AZ31 Mg Alloy with a Vapor Deposition Coating Layer of High Purity Mg / *Materials Transactions*. 2003. Vol. 44. N 4. P. 578 – 582. DOI: 10.2320/matertrans.44.578
6. **Singh B., Singh G., Sidhu B.** Analysis of corrosion behaviour and surface properties of plasma-sprayed composite coating of hydroxyapatite-tantalum on biodegradable Mg alloy ZK60 / *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. N 19. P. 2661 – 2673. DOI: 10.1177/0021998319839127
7. **Yakovleva N. M., Kokatev A. N., Oskin K. I., et al.** Study of black protective-decorative nanocomposite anodic coatings on the surface of AMg5 aluminum alloy / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 7. P. 34 – 44 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-7-34-44
8. **Berezin E. K., Kornev A. B., Rodyushkin V. M.** Ultrasonic diagnostics in the study of coatings applied by gas-flame spraying / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 1. P. 28 – 34 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-1-28-34
9. **Mahallawy N. A., Shoeib M. A., Abouelenain M. H.** Z91 Magnesium Alloys: Anodizing of Using Environmental Friendly Electrolytes / *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2011. Vol. 1. N 2. P. 62 – 72. DOI: 10.4236/jsemat.2011.12010
10. **Karpushenkov S. A., Kulak A. I., Shchukin G. L., et al.** Microplasma Electrochemical Deposition of Aluminum Oxide-Polyethylene Composite Coatings on Iron Surface / *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2010. Vol. 46. N 4. P. 463 – 468. DOI: 10.1134/S207020511004012X
11. **Lu X., Blawert C., Scharnagl N., et al.** Influence of incorporating Si₃N₄ particles into the oxide layer produced by plasma electrolytic oxidation on AM50 Mg alloy on coating morphology and corrosion properties / *Journal of Magnesium and Alloys*. 2013. Vol. 1. N 4. P. 267 – 274. DOI: 10.1016/j.jma.2013.11.001
12. **Lugovskoy A., Zinigrad M., Kossenko A., et al.** Production of ceramic layers on aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation in alkaline silicate electrolytes / *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 743 – 747. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.10.114
13. **Rakoch A. G., Monakhova E. P., Khabibullina Z. V., et al.** Plasma electrolytic oxidation of AZ31 and AZ91 magnesium alloys: Comparison of coatings formation mechanism / *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8. P. 587 – 600. DOI: 10.1016/j.jma.2020.06.002
14. **Hadzima B., Kajaneck D., Jambor M., et al.** PEO of AZ31 Mg Alloy: Effect of Electrolyte Phosphate Content and Current Density / *Metals*. 2020. Vol. 10. P. 1521. DOI: 103390/met10111521
15. **Yerokhin A., Nie X., Leyland A., et al.** Plasma electrolysis for surface engineering / *Surface and Coating Technology*. 1999. Vol. 122. P. 73 – 93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.S0257-8972(99)00441-7
16. **Lu X., Blawert C., Huang Y., et al.** Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles / *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 187. P. 20 – 33. DOI: 101016/electacta.2015.11.033
17. **Lu X., Blawert C., Zheludkevich M., et al.** Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition / *Corrosion Science*. 2015. Vol. 101. P. 201 – 207. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.09.016
18. **Sun X., Zhang J., Pan W., et al.** A review on the preparation and application of BN composite coatings / *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. P. 24 – 39. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.10.259
19. **Ao N., Liu D., Wang S., et al.** Microstructure and Tribological Behavior of a TiO₂/hBN Composite Ceramic Coating Formed via Micro-Arc Oxidation of Ti-6Al-4V Alloy / *Journal of Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. N 10. P. 1071 – 1076. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.06.015
20. **Serdechnova M., Karpushenkov S., Karpushenkova L., et al.** The Influence of PSA Pre-Anodization of AA2024 on PEO Coating Formation: Composition, Microstructure, Corrosion, and Wear Behaviors / *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 2428. DOI: 10.3390/ma11122428