

УДК 621.794.61

А.И. КОМАРОВ, канд. техн. наук

заведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: al_kom@tut.by

А.С. РОМАНЮК

научный сотрудник лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: romanuk.alexandra1@gmail.com

Д.А. ШИПАЛОВ

инженер-электромеханик лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: dmitry60@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.10.2022.

ФОРМИРОВАНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ФОРСТЕРИТОМ МДО-ПОКРЫТИЯ НА МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ МЛ10

Исследованы структура, фазовый состав, микротвердость и адгезионная прочность покрытия на магниевом сплаве МЛ10, модифицированного форстеритом (Mg_2SiO_4) в процессе микродугового оксидирования (МДО). В качестве прекурсора форстерита были использованы добавки в электролит силиката натрия. Установлена закономерность, отражающая минимальную концентрацию силиката натрия в составе электролита, при которой соединения кремния участвуют в процессе образования керамического покрытия на магнии и внедряются в него, образуя сложные соединения (Mg_2SiO_4). При выбранных параметрах МДО и базовом составе электролита модифицирование соединениями кремния начинается с концентрации силиката натрия в электролите 4 г/л. Установлено, что при этой концентрации формируется развитая граница раздела, повышающая адгезионную прочность покрытия. Также наличие в покрытии форстерита приводит к повышению толщины и микротвердости покрытия.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, оксид циркония, магниевый сплав, модифицирование, форстерит, микроструктура, фазовый состав, микротвердость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-61-67>

Введение. Магниевые сплавы являются привлекательным материалом для машиностроения, автомобильной промышленности, аэрокосмической техники, приборостроения из-за их высокой удельной прочности и ультралегкости. В последние годы эти сплавы вызывают повышенный интерес, который обусловлен их особыми свойствами [1]:

- низкая плотность (1,35–1,85 г/см³), что в 1,5–2 раза меньше, чем у алюминиевых сплавов, в 4–5 раз меньше, чем у сталей;
- хорошие механические, конструкционные и служебные свойства в интервале температур от –273 до +350 °С;
- способность поглощать энергию удара и снижать вибрацию благодаря высоким демпфирующим свойствам (по данному показателю превосходят алюминиевые сплавы в 100 раз);
- хорошее электромагнитное и противозащитное экранирование, высокие теплопроводность и теплоемкость;

- стабильность размеров при длительных эксплуатациях и хранении;
- хорошие технологические свойства при обработке резанием, литье (прежде всего, при литье под высоким давлением на машинах с холодной и горячей камерами прессования) и горячей обработке давлением;
- отсутствие эффекта «старения» (охрупчивания) в отличие от конструкционных пластмасс, которые магниевые сплавы могут успешно заменить, обеспечив при этом ряд эксплуатационных и технологических преимуществ;
- практически 100-процентное рециклирование.

Благодаря указанным свойствам, наиболее эффективное применение магниевых сплавов обеспечивается в авиационной и автомобильной промышленности. Актуальность использования конструкционных магниевых сплавов в автомобильной технике в первую очередь вызвана потребностью снижения веса машин с целью экономии топлива. По данным [2] снижение веса автомобиля

на 10 % приводит к уменьшению расхода топлива на 5–6 %, тем самым заметно повышается экологическая безопасность за счет сокращения выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива, преимущественно CO и CO₂. Перспективным представляется также использование магниевых сплавов для изготовления поршней двигателя внутреннего сгорания. Снижение веса поршня за счет использования магниевого сплава уменьшает моменты инерции, позволяя повысить максимальное число оборотов и мощность двигателя.

Однако неудовлетворительная износостойкость и, прежде всего, низкая коррозионная стойкость сдерживают широкое применение магниевых сплавов. При этом возможности повышения этих характеристик путем объемного легирования ограничены из-за сегрегации легирующих элементов, образования хрупких интерметаллидных фаз, высокой стоимости и трудоемкости процесса [3]. Перспективным путем решения проблемы является разработка технологий нанесения покрытий, обеспечивающих высокие износ- и коррозионную стойкость магниевых сплавов.

Одним из наиболее эффективных методов модифицирования поверхности легких сплавов, в том числе магниевых, является технология МДО. Ряд исследований указывает на то, что оксидные керамические покрытия, сформированные по этой технологии на магниевых сплавах, позволяют существенно (на 3–4 порядка) уменьшить ток коррозии по сравнению с незащищенным сплавом [4–11]. При этом структура и состав покрытия обеспечивают достаточно высокое сопротивление коррозии в нейтральной и щелочной среде [11]. Имеется также много данных, согласно которым МДО может значительно улучшить трибологические характеристики магниевых сплавов [11–14]. Важным преимуществом МДО над другими методами получения покрытий является их высокая адгезия, а также возможность формирования покрытий с сохранением исходных размеров обрабатываемых деталей. Кроме того, процесс МДО позволяет осуществить модифицирование формируемых покрытий дисперсными частицами оксидов, добавляемых в электролиты для повышения свойств покрытий. В частности, имеющиеся результаты указывают на то, что оксидирование в электролитах-суспензиях с добавками наноразмерных частиц приводит к дополнительному повышению коррозионной стойкости магния за счет внедрения дисперсных частиц-добавок, уплотняющих покрытие и снижающих его дефектность и пористость [15]. В работе [16] показано, что добавка наночастиц SiO₂ при оксидировании магния Mg96 обеспечивает дополнительное повышение защитных антикоррозионных свойств покрытия от 4 до 6 раз в зависимости от режимов микродугового оксидирования. Авторы связывают такое повышение с образованием в покрытии силиката

магния Mg₂SiO₄, который синтезируется при соединении наночастиц SiO₂ с оксидом магния (MgO) под воздействием высокой температуры микроплазменных разрядов.

В настоящей работе исследуется структура и особенности формирования покрытия на магниевом сплаве МЛ10, модифицированного форстеритом *in situ* из прекурсора в виде силиката натрия.

Методика исследования. Исследования проводились на образцах из магниевых сплавов МЛ10, изготовленных в виде дисков диаметром 30 мм и высотой 5 мм. Перед микродуговой обработкой плоские поверхности образцов шлифовались наждачной бумагой с зернистостью 600, промывались водой и обезжиривались этанолом. Микродуговое оксидирование проводили на установке МДО, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Оксидные слои формировали в электролите на основе водного раствора гидроксида калия (KOH 15 г/л), пиррофосфата натрия (Na₂PO₄ 8 г/л), фторида натрия (NaF 2 г/л, базовый электролит) и силиката натрия (Na₂SiO₃), концентрация которого варьировалась от 4 до 8 г/л.

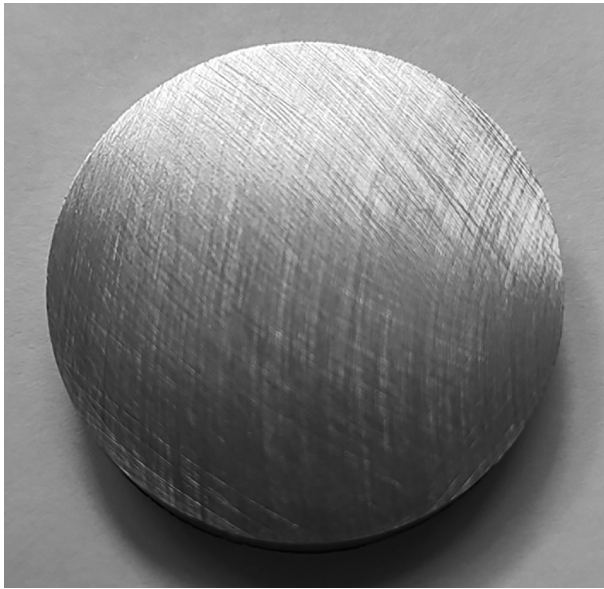
Обработка образцов выполнялась в импульсном режиме при анодно-катодной поляризации с частотой следования импульсов 100 Гц и максимальной амплитудой анодного напряжения 430 В. Время обработки составляло 8 мин.

Фазовый состав покрытия исследовали рентгеновским дифрактометром ДРОН-3М.

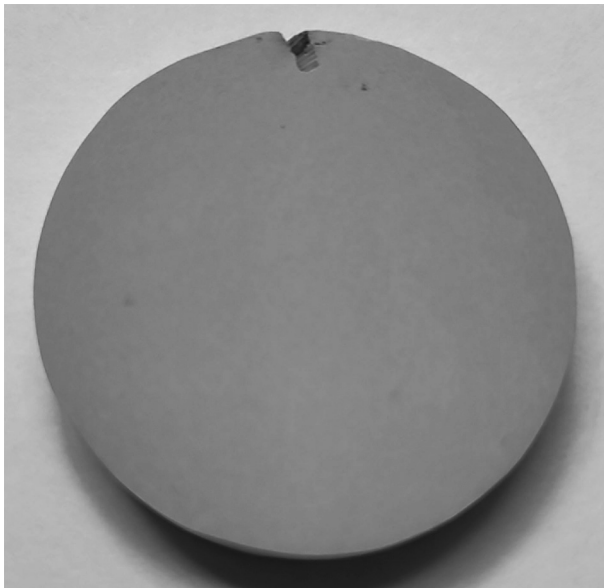
Толщина и микротвердость МДО-слоя измерялись толщиномером «Константа-К5». Измерения микротвердости производились на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76 [17] с использованием в качестве индентора пирамиды Викерса, на которую прикладывалась нагрузка 0,19 Н. Измерение адгезионной прочности и силы трения осуществлялись методом склерометрии на универсальном трибометре MFT-5000 (США).

Результаты и их обсуждение. Микродуговое оксидирование образцов с выбранными параметрами обработки приводит к формированию однородного гладкого покрытия светло-серого цвета (рисунок 1). При этом добавка силиката натрия с концентрацией 2 и 4 г/л не приводит к какому-либо заметному изменению внешнего вида покрытия. Однако измерение толщины покрытия показало, что с увеличением концентрации силиката натрия эта характеристика увеличивается с 20 до 35 мкм (таблица 1).

Изменение концентрации силиката натрия оказывает также воздействие на структуру покрытия (рисунок 2). Металлографический анализ поперечных шлифов образцов показал, что с увеличением концентрации Na₂SiO₃ происходит не только увеличение толщины покрытия, но также снижается его пористость. Так, в базовом электролите (см. рисунок 2 а) и в электролите с концентрацией силиката натрия 2 г/л (см. рисунок 2 б) покрытие характери-



a



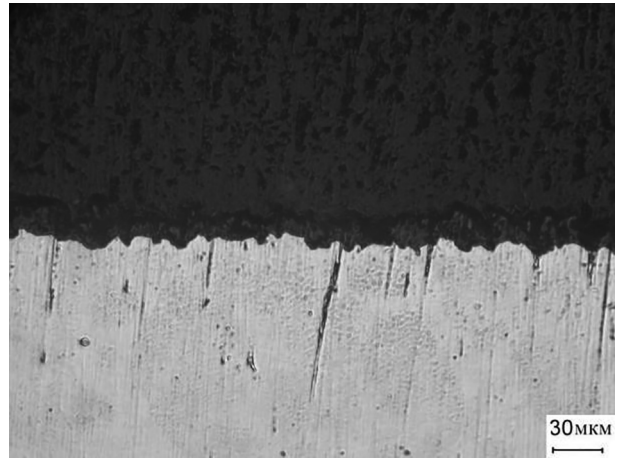
b

Рисунок 1 — Образцы из магниевого сплава МЛ10:
a — исходный; *b* — с покрытием
Figure 1 — Samples of magnesium alloy ML10:
a — initial; *b* — coated

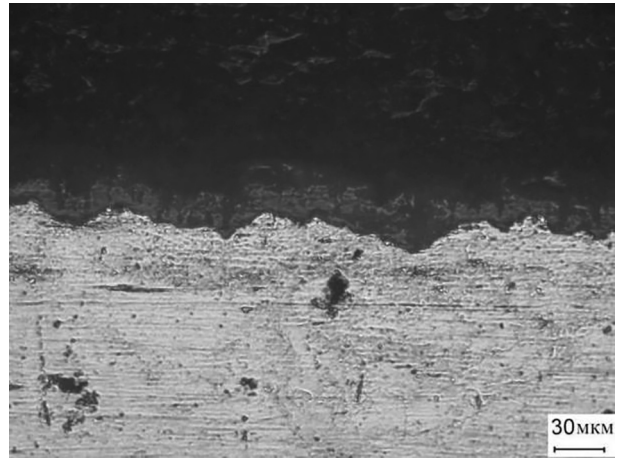
Таблица 1 — Толщина покрытия, полученного в электролитах разного состава
Table 1 — Thickness of the coating obtained in electrolytes of different composition

№ образца	Электролит	Добавка Na_2SiO_3	Толщина покрытия, мкм
1	Водный раствор на основе пирофосфата натрия	—	20
2		2 г/л	28
3		4 г/л	35

зуется наличием сквозных пор, в то время как при концентрации 4 г/л сквозная пористость покрытия отсутствует (см. рисунок 2 *c*). Другой важной особенностью структуры покрытия является формирование в электролите с повышенной концентра-



a



b



c

Рисунок 2 — Микроструктура поперечного сечения образцов с покрытием, полученным в электролите с различным содержанием силиката натрия: *a* — 0; *b* — 2 г/л; *c* — 4 г/л
Figure 2 — Microstructure of the cross-section of samples with a coating obtained in an electrolyte with a different content of sodium silicate: *a* — 0; *b* — 2 g/l; *c* — 4 g/l

цией Na_2SiO_3 развитой границы раздела, которая образуется за счет локального внедрения фрагментов покрытия в металлическую основу (см. рисунок 2 *c*). Наблюдаемый эффект вероятно связан с активизацией процессов растворения магния при повышении концентрации Na_2SiO_3 в электролите,

которые протекают неравномерно ввиду шероховатости поверхности и связанной с ней неравномерности протекания электрохимических реакций на гребнях и впадинах поверхности магния. Отметим, что такая структура покрытия может служить благоприятным фактором, повышающим прочность сцепления покрытия с основой.

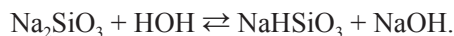
Выполненный рентгеноструктурный анализ показал, что состав покрытия в базовом электролите представлен MgO (рисунок 3 а). Аналогичный состав покрытия формируется при концентрации силиката натрия в электролите 2 г/л (см. рисунок 3 а).

Однако повышение концентрации силиката натрия в составе электролита до 4 г/л приводит к образованию сложных оксидов с участием SiO₂, а именно Mg₂SiO₄ или 2MgO·SiO₂ (см. рисунок 3 б). Таким образом, при использовании силиката натрия в качестве прекурсора SiO₂ модифицирование покрытия кремнием с образованием его соединений происходит при достижении некоторой минимальной концентрации силиката натрия в электролите. Обнаруженная закономерность требует дальнейшего исследования для объяснения этого механизма.

Результаты исследования показали, что силикат натрия может использоваться для модифици-

рования покрытия соединениями кремния также успешно, как и добавка в электролит наночастиц SiO₂. И в том, и в другом случае в составе покрытия синтезируется форстерит. Однако в отличие от непосредственного введения в электролит наночастиц SiO₂ это соединение при использовании силиката натрия образуется прямо в процессе МДО. Механизм преобразования силиката натрия в этом случае выглядит следующим образом.

При введении в воду силикат натрия подвергается гидролизу. Молекулярное уравнение имеет следующий вид:



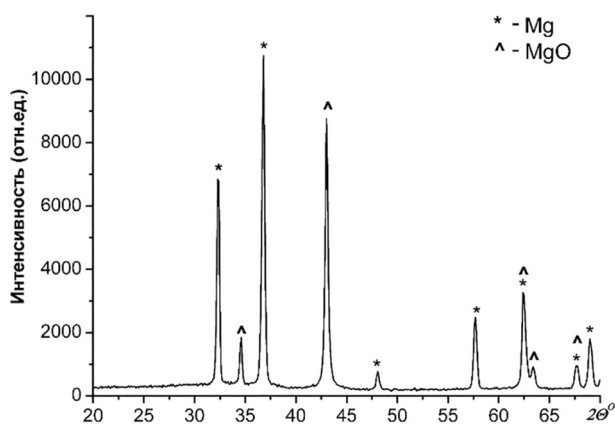
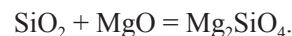
Полное ионное уравнение выглядит следующим образом:



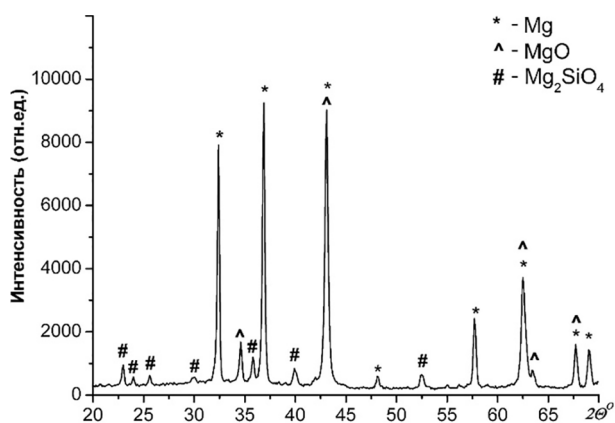
или



МДО — высокотемпературный процесс, поэтому под действием микроплазменных разрядов происходит дегидратация SiO₂. В среде высоких температур внедренный в поверхность керамического покрытия SiO₂ взаимодействует с MgO с образованием сложного соединения Mg₂SiO₄:



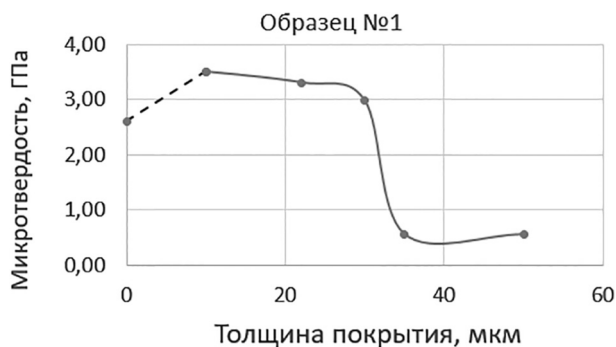
а



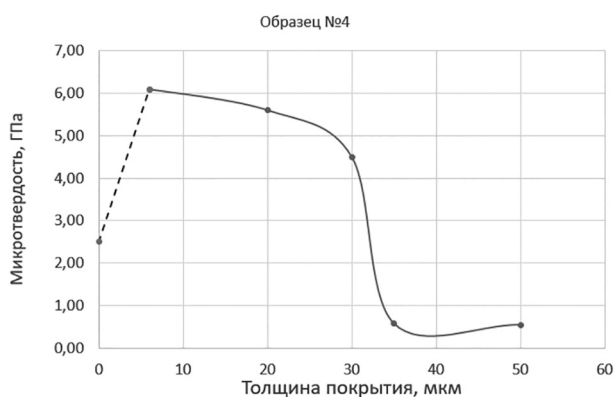
б

Рисунок 3 — Фрагмент дифрактограмм образцов с покрытием, полученных в электролите с различной концентрацией Na₂SiO₃: а — 2 г/л; б — 4 г/л

Figure 3 — Fragment of diffractograms of coated samples obtained in an electrolyte with different concentrations of Na₂SiO₃: а — 2 г/л; б — 4 г/л



а



б

Рисунок 4 — Графики изменения микротвердости покрытия по толщине на образцах, сформированных в базовом электролите (а) и с добавкой Na₂SiO₃ в количестве 4 г/л (б)

Figure 4 — Graphs of changes in the microhardness of the coating by thickness on samples formed in the base electrolyte (а) and with the addition of Na₂SiO₃ in the amount of 4 г/л (б)

Форстерит — неорганическое соединение, молярная масса которого составляет 140,694 г/моль, плотность — 3,21 г/см³. MgO обладает плотностью выше, чем Mg₂SiO₄, и составляет 3,58 г/см³. Более низкая плотность Mg₂SiO₄ приводит к уплотнению покрытия и снижению его пористости, что должно улучшить защитные свойства покрытий.

Помимо улучшения защитных свойств покрытия модифицирование форстеритом приводит к повышению твердости покрытия (рисунок 4). Это связано с более высокой твердостью Mg₂SiO₄ (7 по Моосу) по сравнению с MgO (5,5–6 по Моосу в модификации периклаза). Характер изменения микротвердости по толщине покрытия укладывается в общие тенденции. Так, на поверхности покрытие имеет заниженную твердость, поскольку данная зона имеет высокую пористость и обладает высокой хрупкостью и точное изменение невозможно, затем плато с высоким уровнем твердости, который и характеризует покрытие, ближе к основе твердость несколько снижается (см. рисунок 4, штриховая линия). Поскольку для данных покрытий характерна граница раздела фаз, твердость изменяется резко до уровня твердости сплава основы HV 540–560 МПа.

Измерения адгезионной прочности подтверждают предположение о повышении прочности сцепления покрытия с основой за счет формирования развитой границы раздела (см. рисунок 2 с). Так, среднее значение адгезионной прочности покрытия из базового электролита составило 0,91 ГПа и увеличилось до 1,21 при добавке силиката натрия в количестве 4 г/л (таблица 2). Также с наличием форстерита в покрытии можно связать повышенные трибологические свойства модифицированного покрытия, поскольку Mg₂SiO₄, имеющий гексагональную решетку, теоретически должен обладать пониженным коэффициентом трения в сравнении с MgO, имеющим кубический тип решетки (см. таблицу 2).

Разработанный электролит и полученные результаты исследования были использованы для выполнения хозяйственного договора по формированию защитных покрытий на деталях из литейных магниевых сплавов.

Заключение. Показано, что силикат натрия может использоваться для модифицирования покрытия соединениями кремния (Mg₂SiO₄) также успешно, как и добавка в электролит наночастиц SiO₂.

Таблица 2 — Трибологические и адгезионные свойства покрытий
Table 2 — Tribological and adhesive properties of coatings

№ образца	Электролит	Добавка Na ₂ SiO ₃ , г/л	COF	HG, ГПа
1	Водный раствор на основе пирофосфата натрия	—	0,10–0,35	0,91
2		2	0,15–0,36	1,08
3		4	0,02–0,35	1,21

Установлено, что при использовании силиката натрия в качестве прекурсора SiO₂, модифицирование покрытия кремнием с образованием Mg₂SiO₄ происходит при достижении некоторой минимальной концентрации силиката натрия в электролите. При выбранных параметрах МДО и базовом составе электролита модифицирование соединения кремния начинается с концентрации силиката натрия в электролите 4 г/л.

Показано, что увеличение концентрации силиката натрия в электролите приводит к росту толщины и снижению пористости керамического покрытия за счет синтеза Mg₂SiO₄, обладающего меньшей в сравнении с MgO плотностью. Кроме того, за счет более высокой твердости форстерит приводит к повышению микротвердости покрытия.

Установлено, что повышение содержания силиката натрия в электролите приводит к формированию развитой границы раздела, что повышает адгезионную прочность покрытия.

Список литературы

1. Елкин, Ф.М. Актуальные проблемы металловедения, производства и применения магниевых сплавов / Ф.М. Елкин // Технология легких сплавов. — 2007. — № 1. — С. 5–18.
2. Волкова, Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор) / Е.Ф. Волкова // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2006. — № 11(617). — С. 5–9.
3. Ma, Y. Research on microstructure and alloy phases of AM50 magnesium alloy / Y. Ma, J. Zhang, M. Yang // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Vol. 470, iss. 1–2. — Pp. 515–521. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.047>.
4. Effect of (NaPO₃)₆ Concentrations on Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ91D Magnesium Alloy / H. Luo [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2008. — Vol. 464, iss. 1–2. — Pp. 537–543. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.
5. Effects of Cathode Current Density on Structure and Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on ZK60 Mg Alloy / P. Su [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Vol. 475, iss. 1–2. — Pp. 773–777. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.030>.
6. Effects of Current Frequency on the Structural Characteristics and Corrosion Property of Ceramic Coatings Formed on Magnesium Alloy by PEO Technology / G.-H. Lv [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2008. — Vol. 208, iss. 1–3. — Pp. 9–13. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.125>.
7. Effect of Chloride Ion Level on the Corrosion Performance of MAO Modified AZ31 Alloy in NaCl Solutions / Y. Gu [et al.] // Materials & Design. — 2013. — Vol. 43. — Pp. 542–548. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.049>.
8. Bala Srinivasan, P. Effect of Plasma Electrolytic Oxidation Coating on the Stress Corrosion Cracking Behavior of Wrought AZ61 Magnesium Alloy / P. Bala Srinivasan, C. Blawert, W. Dietzel // Corrosion Science. — 2008. — Vol. 50, iss. 8. — Pp. 2415–2418. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.018>.
9. Environmental Friendly Plasma Electrolytic Oxidation of AM60 Magnesium Alloy and its Corrosion Resistance / F.-H. Cao [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. — 2008. — Vol. 18, iss. 2. — Pp. 240–247. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60043-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60043-6).
10. Influence of Electrolyte on Corrosion Properties of Plasma Electrolytic Conversion Coated Magnesium Alloys / C. Blawert [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2007. — Vol. 201, iss. 21. — Pp. 8709–8714. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.169>.
11. The Effect of Current Mode and Discharge Type on the Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coated

- Magnesium Alloy AJ62 / R.O. Hussein [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2011. — Vol. 206, iss. 7. — Pp. 1990–1997. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.060>.
12. Su, P. Plasma Electrolytic Oxidation of a Low Friction Casting on ZK60 Magnesium Alloy / P. Su, X. Wu, Z. Jiang // Mater. Lett. — 2008. — Vol. 62, iss. 17–18. — Pp. 3124–3126. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.023>.
 13. Characterization of AZ31 Mg Alloy Coated by Plasma Electrolytic Oxidation / S. Durdu [et al.] // Vacuum. — 2013. — Vol. 88. — Pp. 130–133. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.01.009>.
 14. Tribological Behavior of Plasma Electrolytic Oxidation Coating on Magnesium Alloy with Oil Lubrication at Elevated Temperatures / J. Guo. [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Vol. 481, iss. 1–2. — Pp. 903–909.
 15. Comparison of Electrochemical Corrosion Behavior of MgO and ZrO₂ Coatings on AM50 Magnesium Alloy Formed by Plasma Electrolytic Oxidation / J. Liang [et al.] // Corrosion Science. — 2009. — Vol. 51, iss. 10. — Pp. 2483–2492. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.034>.
 16. Влияние добавки в электролит наноразмерных частиц SiO₂ на состав и свойства оксидных слоев, формируемых плазменно-электролитическим окислением магния / Е.Д. Боргардт [и др.] // Вектор науки ТГУ. — 2018. — № 3. — С. 6–13. — DOI: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2018-3-6-13>.
 17. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных накоечников: ГОСТ 9450-76. — Взамен ГОСТ 9450-60; введ. 01.01.77. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 35 с.

KOMAROV Aleksandr I., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials¹

E-mail: al_kom@tut.by

ROMANIUK Alexandra S.

Researcher of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials¹

E-mail: romanuk.alexandra1@gmail.com

SHIPALOV Dmitriy A.

Electrical Engineer of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials¹

E-mail: dmitry60@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 October 2022.

FORMATION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED WITH FORSTERITE MICROARC OXIDATION COATING ON МЛ10 (ML10) MAGNESIUM ALLOY

The structure, phase composition, microhardness, and adhesive strength of a coating on an МЛ10 (ML10) magnesium alloy modified with Mg₂SiO₄ forsterite during microarc oxidation (MAO) have been studied. Sodium silicate additives were used as a forsterite precursor. A pattern has been established that reflects the minimum concentration of sodium silicate in the electrolyte composition, at which silicon compounds participate in the formation of a ceramic coating on magnesium and are introduced into it, forming complex compounds (Mg₂SiO₄). With the chosen MAO parameters and the basic composition of the electrolyte, the modification with silicon compounds begins with a concentration of sodium silicate in the electrolyte of 4 g/l. It has been established that at this concentration, a developed interface is formed, which increases the adhesive strength of the coating. In addition, the presence of forsterite in the coating leads to an increase in the thickness and microhardness of the coating.

Keywords: microarc oxidation, zirconium oxide, magnesium alloy, modification, forsterite, microstructure, phase composition, microhardness

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-61-67>

References

1. Elkin F.M. Aktualnye problemy metallovedeniya, proizvodstva i primeneniya magnievyykh splavov [Topical problems of metallurgy, production and application of magnesium alloys]. *Technology of light alloys*, 2007, no. 1, pp. 5–18 (in Russ.).
2. Volkova E.F. Sovremennye deformiruyemye splavy i kompozitsionnye materialy na osnove magniya (obzor) [Modern Mg-based wrought alloys and composites (review)]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2006, no. 11(617), pp. 5–9 (in Russ.).
3. Ma Y., Zhang J., Yang M. Research on microstructure and alloy phases of AM50 magnesium alloy. *Journal of alloys and compounds*, 2009, vol. 470, iss. 1–2, pp. 515–521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.047>.
4. Luo H., Cai Q., Wei B., Yu B., Li D., He J., Liu Z. Effect of (NaPO₃)₆ concentrations on corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on AZ91D magnesium alloy. *Journal of alloys and compounds*, 2008, vol. 464,

- iss. 1–2, pp. 537–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.
5. Su P., Wu X., Guo Y., Jiang Z. Effects of cathode current density on structure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on ZK60 Mg alloy. *Journal of alloys and compounds*, 2009, vol. 475, iss. 1–2, pp. 773–777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.030>.
 6. Lv G.-H., Chen H., Gu W.-C., Li L., Niu E.-W., Zhang X.-H., Yang S.-Z. Effects of current frequency on the structural characteristics and corrosion property of ceramic coatings formed on magnesium alloy by PEO technology. *Journal of materials processing technology*, 2008, vol. 208, iss. 1–3, pp. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.125>.
 7. Gu. Y., Cai X., Guo Y., Ning C. Effect of chloride ion level on the corrosion performance of MAO modified AZ31 alloy in NaCl solutions. *Materials & design*, 2013, vol. 43, pp. 542–548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.049>.
 8. Bala Srinivasan P., Blawert C., Dietzel W. Effect of plasma electrolytic oxidation coating on the stress corrosion cracking behavior of wrought AZ61 magnesium alloy. *Corrosion science*, 2008, vol. 50, iss. 8, pp. 2415–2418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.018>.
 9. Cao F.-H., Lin L.-Y., Zhang Z., Zhang J.-Q., Cao C.-N. Environmental friendly plasma electrolytic oxidation of AM60 magnesium alloy and its corrosion resistance. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, vol. 18, iss. 2, pp. 240–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60043-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60043-6).
 10. Blawert C., Heitmann V., Dietzel W., Nykyforchyn H.M., Klapkiv M.D. Influence of electrolyte on corrosion properties of plasma electrolytic conversion coated magnesium alloys. *Surface and coatings technology*, 2007, vol. 201, iss. 21, pp. 8709–8714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.169>.
 11. Hussein R.O., Zhang P., Nie X., Xia Y., Northwood D.O. The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62. *Surface and coatings technology*, 2011, vol. 206, iss. 7, pp. 1990–1997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.060>.
 12. Su P., Wu X., Jiang Z. Plasma electrolytic oxidation of a low friction casting on ZK60 magnesium alloy. *Materials letters*, 2008, vol. 62, iss. 17–18, pp. 3124–3126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.023>.
 13. Durdu S., Bayramoğlu S., Demirtaş A., Usta M., Hikmet Üçışık A. Characterization of AZ31 Mg alloy coated by plasma electrolytic oxidation. *Vacuum*, 2013, vol. 88, pp. 130–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.01.009>.
 14. Guo J., Wang L., Liang J., Xue Q., Yan F. Tribological behavior of plasma electrolytic oxidation coating on magnesium alloy with oil lubrication at elevated temperatures. *Journal of alloys and compounds*, 2009, vol. 481, iss. 1–2, pp. 903–909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.147>.
 15. Liang J., Bala Srinivasan P., Blawert C., Dietzel W. Comparison of electrochemical corrosion behavior of MgO and ZrO₂ coatings on AM50 magnesium alloy formed by plasma electrolytic oxidation. *Corrosion science*, 2009, vol. 51, iss. 10, pp. 2483–2492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.034>.
 16. Borgardt E.D., Polunin A.V., Ivashin P.V., Krishtal M.M. Vliyaniye dobavki v elektrolit nanorazmernykh chastits SiO₂ na sostav i svoystva oksidnykh sloev, formiruemykh plazmenno-elektroliticheskim oksidirovaniem magniya [The influence of the addition of SiO₂ nano-dimensional particles to the electrolyte on the composition and properties of the oxide layers formed by the plasma-electrolytic oxidation on magnesium]. *Science vector of Togliatti State University*, 2018, no. 3, pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2018-3-6-13> (in Russ.).
 17. State Standard 9450-76. *Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. Moscow, Standartov Publ., 1993. 35 p. (in Russ.).