

Научная статья
УДК 544.63:620.197.3(539.232)
DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_5

Влияние ингибиторов группы азолов на антикоррозионную эффективность покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве

А.С. Гнеденков, Я.И. Кононенко[✉], С.Л. Синебрюхов, В.С. Филолина, И.Е. Вялый, С.В. Гнеденков

Андрей Сергеевич Гнеденков
профессор РАН, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
asg17@mail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Яна Игоревна Кононенко
младший научный сотрудник, аспирант
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
kononenko.yai@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-2299-9009>

Сергей Леонидович Синебрюхов
член-корреспондент РАН, доктор химических наук, доцент, заместитель директора
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
sls@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Валерия Станиславовна Филолина
младший научный сотрудник, аспирант
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
filonina.vs@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9544-3597>

Игорь Евгеньевич Вялый
кандидат химических наук, научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
vyaly@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0003-3806-1709>

Сергей Васильевич Гнеденков
член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, директор
Институт химии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
svg21@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Аннотация. В работе показано, что композиционные покрытия, сформированные методом плазменного электролитического оксидирования и импрегнированные ингибиторами коррозии из группы азолов (в концентрации 0,05 М и 0,1 М), существенно улучшают коррозионные характеристики алюминиевого сплава АМг3. С целью определения зависимости защитных свойств покрытий от концентрации внедряемых ингибиторов изучены морфологические и электрохимические свойства полученных композиционных покрытий. Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии установлено, что ПЭО-покрытие, состоящее из оксида алюминия, имеет

самоорганизованную микротрубчатую структуру (диаметр и высота микротрубок составили 300–500 нм и 9–10 мкм соответственно). Исследование антикоррозионных свойств покрытий методом электрохимической импедансной спектроскопии показало, что все образцы с покрытиями более коррозионно устойчивы, чем алюминиевый сплав без покрытия. Увеличение концентрации ингибиторов коррозии до 0,1 М приводит к снижению защитных свойств покрытий, что может быть связано с образованием соединений, обладающих более высокой растворимостью по сравнению с ПЭО-слоем.

Ключевые слова: композиционные защитные покрытия, алюминиевый сплав, плазменное электролитическое оксидирование, ингибиторы коррозии, азолы, электрохимическая импедансная спектроскопия

Для цитирования: Гнеденков А.С., Кононенко Я.И., Синебрюхов С.Л., Филонина В.С., Вялый И.Е., Гнеденков С.В. Влияние ингибиторов группы азолов на антикоррозионную эффективность покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 6. С. 57–65. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698-2022_226_06_5.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-10148 – подготовка образцов, формирование защитного покрытия и электрохимические измерения; грант № 20-13-00130 – исследование состава покрытия), в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (№ FWFN(0205)-2022-0003).

Original article

Effect of azole group inhibitors on the anticorrosion efficiency of coatings formed on aluminum alloy

A.S. Gnedenkov, Ya.I. Kononenko, S.L. Sinebryukhov, V.S. Filonina, I.E. Vyalyi, S.V. Gnedenkov

Andrey S. Gnedenkov
Professor of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry
Leading Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
asg17@mail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9822-7849>

Yana I. Kononenko
Junior Researcher
Postgraduate student
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
kononenko.yai@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-2299-9009>

Sergey L. Sinebryukhov
Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry, Associate Professor

Deputy Director
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sls@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

Valeriya S. Filonina
Junior Researcher
Postgraduate student
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
filonina.vs@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-9544-3597>

Igor E. Vyalyi
Candidate of Sciences in Chemistry
Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
vyalyi@ich.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0003-3806-1709>

Sergey V. Gnedenkov

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry, Professor

Director

Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

svg21@hotmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Abstract. As a result of this work, it was found that composite coatings formed by plasma electrolytic oxidation (PEO) and impregnated with corrosion inhibitors of the azole group (in concentration of 0.05 M and 0.1 M) significantly improve the corrosion performance of the AlMg3 aluminum alloy. In order to reveal the dependence of the protective properties of coatings on concentration of incorporated inhibitors, the morphological and electrochemical properties of composite coatings were studied. Using the methods of scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) it was found that the PEO-coating composed of aluminium oxide is characterized by a self-organized microtubular structure (with microtube diameter varying from 300 to 500 nm, and a tube height of 9–10 μm). The study of anticorrosion characteristics of coatings by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) showed that all samples with coatings showed better anticorrosion properties, in comparison with bare aluminum alloy. Increase in the concentration of corrosion inhibitors up to 0.1 M results in decrease of the protective properties of such coatings, which may be due to the formation of compounds with a higher solubility compared to the PEO-layer.

Keywords: composite protective coatings, aluminum alloy, plasma electrolytic oxidation, corrosion inhibitors, azoles, electrochemical impedance spectroscopy

For citation: Gnedenkov A.S., Kononenko Ya.I., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S., Vyaliy I.E., Gnedenkov S.V. Effect of azole group inhibitors on the anticorrosion efficiency of coatings formed on aluminum alloy. *Vestnik of the FEB RAS*. 2022;(6):57-65. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2022_226_06_5.

Funding. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 21-73-10148 – sample preparation, formation of a protective coating and electrochemical measurements; grant no. 20-13-00130 – study of the composition of the coating), within the framework of the state task of the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. FWFN(0205)-2022-0003).

Введение

Алюминиевые сплавы широко используются во многих отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов благодаря таким важным свойствам, как легкий вес, прочность, пластичность. Однако эксплуатация алюминиевых сплавов в агрессивных средах приводит к коррозионной деградации металла [1, 2].

Эффективным способом снижения интенсивности коррозии алюминиевых сплавов является формирование на их поверхности защитных покрытий. Плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) – один из наиболее простых и оптимальных методов защиты поверхности вентиляемых металлов (в том числе алюминия и его сплавов) [3–10]. В ряде случаев продолжительность антикоррозионной защиты ПЭО-покрытий может быть недостаточной из-за высокой неоднородности (включая пористость) получаемых поверхностных слоев. Для обеспечения пролонгированного действия защитных свойств используются ингибиторы коррозии [11–14]. Наиболее изучены из них фосфаты, нитриты, молибдаты,

вольфраматы, ванадаты, бораты, соли редкоземельных элементов и органические ингибиторы коррозии, в том числе различные типы азолов [15]. Так, авторы статьи [16] сообщают о высокой эффективности многослойного композиционного покрытия, сформированного золь-гель методом, с включением бензотриазола. Установлено, что данный ингибитор коррозии в защитном слое способен запускать процесс самозалечивания повреждений покрытия на сплаве AA7075 [16]. Одним из преимуществ многослойных покрытий является возможность увеличения концентрации внедряемого ингибитора в слоях, прилегающих к сплаву, с целью снижения интенсивности протекания локальной коррозии.

Цель данной работы состоит в формировании на алюминиевом сплаве марки АМг3 композиционных покрытий с высокими защитными свойствами на основе пористого ПЭО-слоя, служащего контейнером для ингибиторов коррозии. Импрегнирование ПЭО-покрытия проводилось ингибиторами группы азолов в различной концентрации.

Материалы и методики экспериментов

Испытания проводили на образцах из алюминиевого сплава АМг3 (система Al–Mg–Mn–Si, в масс. %: 94,31 Al; 3,8 Mg; 0,6 Mn; 0,8 Si; до 0,5 Fe; а также Ti, Cu, Zn до 0,1 каждого). Были использованы пластины сплава размерами 20×30×2 мм. Предварительную подготовку образцов для снижения шероховатости поверхности осуществляли на ручном шлифовально-полировальном станке посредством мокрого шлифования с использованием бумаги из карбида кремния с последовательным уменьшением размера абразивного зерна от 40 до 10 мкм. Далее образцы промывали в изопропиловом спирте и сушили в эксикаторе до полного высыхания.

ПЭО-покрытие формировали в гальваностатическом режиме в течение 40 с на тиристорном агрегате, используемом в качестве источника тока. Плотность тока равнялась $1,79 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ при скважности равной 1. Электролитом служил охлаждаемый до 8 °С с помощью чиллера водный раствор 20 г/л тартрата калия и 0,6 г/л фторида натрия [17]. Для обеспечения заполнения микротрубок ПЭО-покрытия ингибитором коррозии использовались водные растворы 1,2,4-триазола и бензотриазола в концентрациях 0,05 М и 0,1 М. Образцы подвергали вакуумному импрегнированию с временем выдержки 1 ч при постоянном перемешивании. Затем в течение 24 ч образцы просушивали в сушильном шкафу при температуре 40 °С.

Для анализа морфологии и состава поверхности использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) Sigma 300 VP (Carl Zeiss, Германия) и растровый электронный микроскоп с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) EVO 40 (Carl Zeiss, Германия). Антикоррозионные свойства сформированных покрытий оценивали методом электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС). Эксперименты проводили в трехэлектродной ячейке с хлоридсеребряным электродом (Ag/AgCl) в качестве электрода сравнения и платиновой сеткой в качестве противоиэлектрода, на электрохимической системе потенциостат/гальваностат Versa STAT MC (Princeton Applied Research, США). Электролитом являлся 3 масс.% раствор NaCl.

Результаты и обсуждение

В работе были сформированы на алюминиевом сплаве АМгЗ композиционные покрытия – ПЭО-слои, импрегнированные ингибиторами триазольной группы, и изучены их свойства. РЭМ-анализ поверхности образцов (рис. 1, *а*) показал, что ПЭО-покрытие имеет пористую структуру, поры которой могут служить микроконтейнерами для внедрения ингибитора. Диаметр пор варьирует от 300 до 500 нм. Из анализа изображения поперечного сечения образца можно сделать вывод, что покрытие имеет упорядоченную самоорганизованную микротрубчатую структуру, высота трубки которой составляет в среднем 9–10 мкм (рис. 1, *б*).

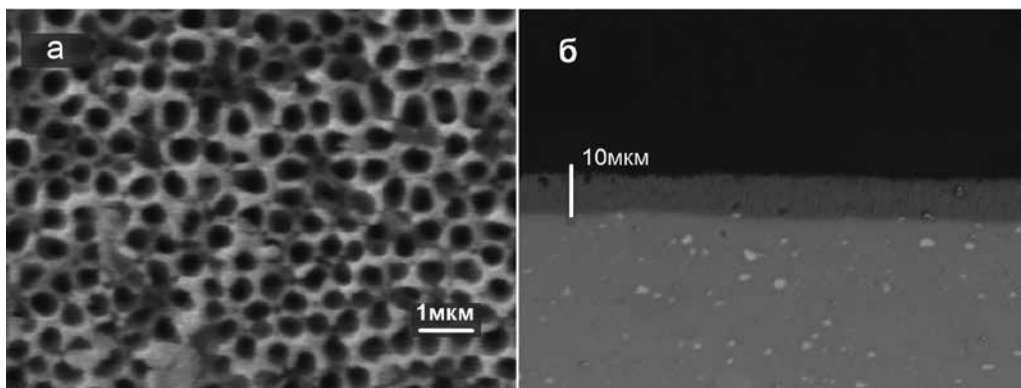


Рис. 1. РЭМ-изображения ПЭО-покрытия: *а* – поверхность, *б* – поперечный шлиф ПЭО-слоя

По данным ЭДС, основными элементами покрытия являются алюминий (рис. 2, *а*) и кислород (рис. 2, *в*). Магний содержится в небольшом количестве в составе защитного слоя (рис. 2, *б*). Наличие магния в покрытии объясняется составом исходного сплава АМгЗ (магний – один из легирующих элементов этого сплава). Такие элементы, как фтор, углерод, натрий и калий, присутствующие в составе электролита для ПЭО, не были установлены в составе покрытия.

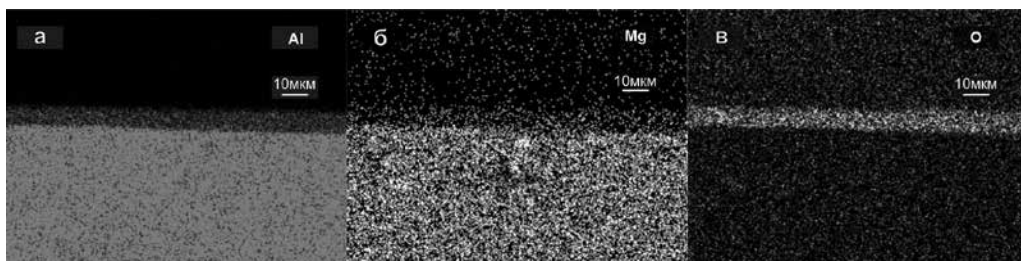


Рис. 2. Распределение элементов по поперечному сечению образца с ПЭО-слоем: *а* – алюминия, *б* – магния, *в* – кислорода

Электрохимические свойства образцов после выдержки их в течение 1 ч в 3 масс.% растворе NaCl были изучены методом ЭИС (см. таблицу). Представлены результаты исследования образцов с различными видами обработки поверхности: сплав АМгЗ без покрытия (1.1), выдержанный в течение 1 ч в растворе с концентрацией 0,1 М 1,2,4-триазола (1.2) или бензотриазола (1.3), с ПЭО-покрытием (2.1), с ингибиторсодержащими ПЭО-слоями – полученными в растворе 1,2,4-триазола в концентрации 0,05 М (2.2) и 0,1 М (2.3) и бензотриазола в

концентрации 0,05 М (2.4) и 0,1 М (2.5). Приведенные в таблице значения модуля импеданса нормированы на площадь образца.

Таблица

**Электрохимические параметры образцов
с различным видом обработки поверхности (по данным ЭИС)**

Номер образца	Вид обработки	$ Z _{f=0,1 \text{ Гц}}$, Ом·см ²
1.1	АМг3 без покрытия	$2,56 \cdot 10^4$
1.2	АМг3 1,2,4-тр 0,1 М	$7,23 \cdot 10^6$
1.3	АМг3 б-тр 0,1 М	$6,40 \cdot 10^6$
2.1	ПЭО-покрытие	$4,65 \cdot 10^6$
2.2	ПЭО 1,2,4-тр 0,05 М	$6,61 \cdot 10^7$
2.3	ПЭО 1,2,4-тр 0,1 М	$6,11 \cdot 10^6$
2.4	ПЭО б-тр 0,05 М	$1,63 \cdot 10^7$
2.5	ПЭО б-тр 0,1 М	$7,72 \cdot 10^6$

Полученные результаты свидетельствуют о более высоких защитных свойствах образцов 1.2 и 1.3 по сравнению с АМг3 без ингибиторов (см. таблицу), что указывает на высокую эффективность выбранных ингибиторов для сплава АМг3. Значения модуля импеданса, измеренного на частоте $f=0,1$ Гц ($|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$), говорят о том, что после 1 ч выдержки все образцы с композиционными ингибиторсодержащими покрытиями (2.2–2.5) обладают более высокой коррозионной стойкостью, чем образцы без покрытия (1.1) и с базовым ПЭО-слоем (2.1).

Лучшими защитными свойствами характеризуется образец с ПЭО-слоем, пропитанным 1,2,4-триазолом в концентрации 0,05 М (2.2). Значение $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$ для данного композиционного покрытия более чем на порядок выше, чем для образца с базовым ПЭО-слоем (см. таблицу).

Увеличение концентрации ингибиторов до 0,1 М приводит к снижению $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$ (см. таблицу) и, как следствие, снижению коррозионной стойкости из-за возможной деградации ПЭО-слоя, что согласуется с данными, представленными в [16]. Этот результат может быть объяснен вероятной реакцией ингибитора с компонентами ПЭО-покрытия и последующим образованием соединений, обладающих более высокой растворимостью по сравнению с ПЭО-слоем [18]. Следует отметить, что более низкие значения $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$ для ПЭО с ингибиторами в концентрации 0,1 М по сравнению с ПЭО 1,2,4-тр 0,05 М и ПЭО б-тр 0,05 М могут быть также связаны с возможно меньшей плотностью сформированного ингибиторсодержащего слоя. Однако все покрытия с ингибитором обладают более высокими защитными свойствами по сравнению с базовым ПЭО-слоем.

1,2,4-триазол и бензотриазол используются для замедления скорости коррозии материалов на основе Cu, Fe, Zn, Mg и Al. Механизм защиты от коррозии основан на адсорбции ингибитора коррозии на поверхности обрабатываемого металла или сплава [19–22]. Важно то, что ПЭО-покрытие благодаря своей морфологии подходит для использования в качестве матрицы для хранения ингибитора. В результате деградации ПЭО-покрытия при выдержке образца в агрессивной среде ингибитор может выходить из пор ПЭО-слоя, диффундировать на поврежденную часть поверхности и образовывать дополнительный барьерный слой, который будет замедлять скорость коррозии материала.

Выводы

В ходе проведенного исследования на алюминиевом сплаве АМгЗ были сформированы гетерооксидные слои с микротрубчатой структурой. Импрегнация ПЭО-покрытия ингибиторами коррозии способствовала значительному повышению коррозионной стойкости исследуемого материала. ПЭО-покрытие, обработанное 1,2,4-триазолом в концентрации 0,05 М, характеризуется лучшими защитными свойствами, нежели обработанное 1,2,4-триазолом в концентрации 0,1 М.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0,5 M NaCl solution. Pt 1: Specificity of development // *Materials*. 2018. Vol. 11 (10). P. 2053. DOI: 10.3390/ma11102053
2. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 alloy // *Materials*. 2019. Vol. 12 (16). P. 2615. DOI: 10.3390/ma12162615
3. Junyi L., Xiaohu H., Yi R. et al. Galvanic corrosion protection of Al-alloy in contact with carbon fibre reinforced polymer through plasma electrolytic oxidation treatment // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. P. 4532. DOI: 10.1038/s41598-022-08727-7
4. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0,5 M NaCl solution. Pt 2: Coating protection // *Materials*. 2018. Vol. 11 (11). P. 2177. DOI: 10.3390/ma11112177
5. Da Silva T.C., Martin J., Marcos G. et al. Evidence of in-depth incorporation of carbon nanotubes in alumina layers grown by plasma electrolytic oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 440. P. 128489. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128489
6. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov S.L. et al. Composite protective coatings on nitinol surface // *Materials and Manufacturing Processes*. 2008. Vol. 8 (23). P. 879–883. DOI: 10.1080/10426910802385117
7. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Khrisanfova O.A., Gnedenkov S.V. Influence of plasma electrolytic oxidation on mechanical characteristics of NiTi alloy // *Surface Engineering*. 2009. Vol. 8 (25). P. 565–569. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64171-7
8. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L. et al. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. P. 109254. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109254
9. Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Хрисанфова О.А. и др. Свойства покрытий, сформированных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования // *Вестн. ДВО РАН*. 2010. № 5 (153). С. 35–46.
10. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S. et al. Smart composite antibacterial coatings with active corrosion protection of magnesium alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. (In Press). DOI: 10.1016/j.jma.2022.05.002
11. Kozlica D.K., Kokalj A., Milošev I. Synergistic effect of 2-mercaptobenzimidazole and octylphosphonic acid as corrosion inhibitors for copper and aluminium – An electrochemical, XPS, FTIR and DFT study // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 182. P. 109082. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.109082
12. Yabuki A., Nagayama Y., Fathona W.I. Porous anodic oxide film with self-healing ability for corrosion protection of aluminum // *Electrochimica Acta*. 2019. Vol. 296. P. 662–668. DOI:10.1016/j.electacta.2018.11.119
13. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Inhibitor-containing composite coatings on Mg alloys: Corrosion mechanism and self-healing protection // *Solid State Phenomena*. 2015. Vol. 245. P. 89–96. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.245.89
14. Akhondi M., Jamalizadeh E. Fabrication of β -cyclodextrin modified halloysite nanocapsules for controlled release of corrosion inhibitors in self-healing epoxy coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 145. P. 105676. DOI:10.1016/j.porgcoat.2020.105676
15. Zhang F., Ju P., Pan M. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 144. P. 74–88. DOI:10.1016/j.corsci.2018.08.005

16. Farahani M., Yousefnia H., Seyedraoufi Z.S., Shajari Y. The effect of benzotriazole gradual change on the corrosion performance of nanocomposite multilayer self-healing coating based on titania-alumina-benzotriazole on AA7075 // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. P. 16584–16590. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.05.197

17. Гнеденков С.В., Егоркин В.С., Синебрюхов С.Л. и др. Супергидрофобные защитные покрытия на сплаве алюминия // *Вестн. ДВО РАН*. 2014. № 2 (174). С. 52–61.

18. Vaghefinazari B., Wang C., Mercier D. et al. Adverse effect of 2,5PDC corrosion inhibitor on PEO coated magnesium // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 192. P. 109830. DOI:10.1016/j.corsci.2021.109830

19. Zheludkevich M.L., Yasakau K.A., Poznyak S.K., Ferreira G.S.M. Triazole and thiazole derivatives as corrosion inhibitors for AA2024 aluminium alloy // *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47 (12). P. 3368–3383. DOI:10.1016/j.corsci.2005.05.040

20. Sun M., Yerokhin A., Bychkova M.Ya. et al. Self-healing plasma electrolytic oxidation coatings doped with benzotriazole loaded halloysite nanotubes on AM50 magnesium alloy // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. P. 753–769. DOI:10.1016/j.corsci.2016.06.016

21. Williams G., Coleman A.J., McMurray H.N. Inhibition of aluminium alloy AA2024-T3 pitting corrosion by copper complexing compounds // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55 (20). P. 5947–5958. DOI:10.1016/j.electacta.2010.05.049

22. Recloux I., Andreatta F., Druart M.-E. et al. Stability of benzotriazole-based films against AA2024 aluminium alloy corrosion process in neutral chloride electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 735. P. 2512–2522. DOI:10.1016/j.jallcom.2017.11.346

REFERENCES

1. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0,5 M NaCl solution. Pt 1: Specificity of development. *Materials*. 2018;11(10):2053. DOI: 10.3390/ma11102053

2. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 Alloy. *Materials*. 2019;12(16):2615. DOI: 10.3390/ma12162615

3. Junyi L., Xiaohu H., Yi R. et al. Galvanic corrosion protection of Al-alloy in contact with carbon fibre reinforced polymer through plasma electrolytic oxidation treatment. *Scientific Reports*. 2022;12:4532. DOI: 10.1038/s41598-022-08727-7

4. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V. et al. Corrosion of the welded aluminium alloy in 0,5 M NaCl solution. Pt 2: Coating protection. *Materials*. 2018;11(11):2177. DOI: 10.3390/ma11112177

5. Da Silva T.C., Martin J., Marcos G. et al. Evidence of in-depth incorporation of carbon nanotubes in alumina layers grown by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2022;440:128489. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128489

6. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov S.L. et al. Composite protective coatings on nitinol surface. *Materials and Manufacturing Processes*. 2008;8(23):879-883. DOI: 10.1080/10426910802385117

7. Sinebryukhov S.L., Gnedenkov A.S., Khrisanfova O.A., Gnedenkov S.V. Influence of plasma electrolytic oxidation on mechanical characteristics of NiTi alloy. *Surface Engineering*. 2009;8(25):565-569. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64171-7

8. Gnedenkov A.S., Lamaka S.V., Sinebryukhov S.L. et al. Control of the Mg alloy biodegradation via PEO and polymer-containing coatings. *Corrosion Science*. 2021;182:109254. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109254

9. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Khrisanfova O.A. et al. Properties of coatings formed on magnesium alloy MA 8 by the method of plasma electrolytic oxidation. *Vestnik of the FEB RAS*. 2010; 5(153):35-46. (In Russ.).

10. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Filonina V.S. et al. Smart composite antibacterial coatings with active corrosion protection of magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. (In Press). DOI: 10.1016/j.jma.2022.05.002

11. Kozlica D.K., Kokalj A., Milošev I. Synergistic effect of 2-mercaptobenzimidazole and octylphosphonic acid as corrosion inhibitors for copper and aluminium – An electrochemical, XPS, FTIR and DFT study. *Corrosion Science*. 2021;182:109082. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.109082

12. Yabuki A., Nagayama Y., Fathona W. I. Porous anodic oxide film with self-healing ability for corrosion protection of aluminum. *Electrochimica Acta*. 2019;296:662-668. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.11.119

13. Gnedenkov A.S., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Gnedenkov S.V. Inhibitor-containing composite coatings on Mg alloys: Corrosion mechanism and self-healing protection. *Solid State Phenomena*. 2015;245:89-96. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.245.89
14. Akhondi M., Jamalizadeh E. Fabrication of β -cyclodextrin modified halloysite nanocapsules for controlled release of corrosion inhibitors in self-healing epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2020;145:105676. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105676
15. Zhang F., Ju P., Pan M. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review. *Corrosion Science*. 2018;144:74-88. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.08.005
16. Farahani M., Yousefnia H., Seyedraoufi Z.S., Shajari Y. The effect of benzotriazole gradual change on the corrosion performance of nanocomposite multilayer self-healing coating based on titania-alumina-benzotriazole on AA7075. *Ceramics International*. 2019;45:16584-16590. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.05.197
17. Gnedenkov A.S., Egorin V.S., Sinebryukhov S.L. et al. Superhydrophobic protective coatings on the surface of magnesium alloy. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;2(174):52-61. (In Russ.).
18. Vaghefnazari B., Wang C., Mercier D. et al. Adverse effect of 2,5PDC corrosion inhibitor on PEO coated magnesium. *Corrosion Science*. 2021;192:109830. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109830
19. Zheludkevich M.L., Yasakau K.A., Poznyak S.K., Ferreira G.S.M. Triazole and thiazole derivatives as corrosion inhibitors for AA2024 aluminium alloy. *Corrosion Science*. 2005;47(12):3368-3383. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.05.040
20. Sun M., Yerokhin A., Bychkova M.Ya. et al. Self-healing plasma electrolytic oxidation coatings doped with benzotriazole loaded halloysite nanotubes on AM50 magnesium alloy. *Corrosion Science*. 2016;111:753-769. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.06.016
21. Williams G., Coleman A.J., McMurray H.N. Inhibition of aluminium alloy AA2024-T3 pitting corrosion by copper complexing compounds. *Electrochimica Acta*. 2010;55(20):5947-5958. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.05.049
22. Recloux I., Andreatta F., Druart M.-E. et al. Stability of benzotriazole-based films against AA2024 aluminium alloy corrosion process in neutral chloride electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;735:2512-2522. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.346