

**КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ И АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Zn22Al,  
ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ****И.Б. Хакимов, Ф.А. Рахимов, И.Н. Ганиев, З.Р. Обидов**

Искандар Бозорович Хакимов\*

Институт технологии и инновационного менеджмента в г. Куляб, ул. Борбад, Куляб, Республика Таджикистан, 735360

E-mail: elita-91@mail.ru\*

Фируз Акбарович Рахимов

Государственное научное учреждение «Центр исследования инновационных технологий» при НАН Таджикистана, ул. Айни, 299/3, Душанбе, Республика Таджикистан, 734063

E-mail: r.f.a-040891@bk.ru

Изатулло Наврузович Ганиев, Зиедулло Рахматович Обидов

Института химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, ул. Айни, 299/2, Душанбе, Республика Таджикистан, 734063

E-mail: ganiev48@mail.ru, z.r.obidov@rambler.ru

*В статье приведены результаты исследования кинетики окисления и анодного поведения цинк-алюминиевого сплава Zn22Al, легированного никелем, в различных коррозионных средах. Определены кинетические и энергетические параметры процесса высокотемпературного окисления сплавов. Показано, что процесс высокотемпературного окисления образцов сплавов Zn22Al-Ni характеризуется монотонным снижением истинной скорости окисления и повышением эффективной энергии активации при содержании легирующего компонента в исходном сплаве Zn0,5Al до 0,5 мас.%. Выявлено, что добавки никеля в пределах изученной концентрации (0.01-0.5 мас.%) несколько увеличивают окисляемость базового сплава Zn22Al при температурах 523, 573 и 623 К. Показано, что зависимость потенциала коррозии цинк-алюминиевых сплавов от содержания в них никеля имеет однопиковый характер, т.е. добавки легирующего компонента способствуют смещению потенциала коррозии в область положительных значений. Установлено влияние агрессивности коррозионной среды на анодное поведение сплавов при сравнении концентрированных электролитов по мере возрастания концентрации хлорид ионов в растворе хлорида натрия. Определено, что потенциалы пассивации и репассивации исходных сплавов с ростом концентрации никеля в сплавах смещаются в более положительную область. Наибольший сдвиг данных потенциалов в положительную область наблюдается при легировании сплавов, содержащих малые добавки никеля. Показано, что продукты коррозии исследованных сплавов состоят из смеси защитных оксидных пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, NiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZnO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлено, что легирование цинк-алюминиевых сплавов никелем (в пределах 0,01–0,05 мас.%) способствует уменьшению скорости коррозии базового сплава в 2–3 раза. Предложенные составы сплавов могут быть использованы в качестве анодного покрытия для защиты от коррозии стальных изделий и конструкций.*

**Ключевые слова:** сплав Zn22Al, никель, термогравиметрический и потенциостатический метод, скорость окисления, потенциодинамический режим, скорость коррозии, анодное поведение

**Для цитирования:**

Хакимов И.Б., Рахимов Ф.А., Ганиев И.Н., Обидов З.Р. Кинетика окисления и анодное поведение сплава Zn22Al, легированного никелем. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 35–40

**For citation:**

Khakimov I.B., Rakhimov F.A., Ganiev I.N., Obidov Z.R. Oxidation kinetic and anodic behavior of Zn22Al alloy doped with nickel. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 6. P. 35–40

## OXIDATION KINETIC AND ANODIC BEHAVIOR OF Zn22Al ALLOY DOPED WITH NICKEL

I.B. Khakimov, F.A. Rakhimov, I.N. Ganiev, Z.R. Obidov

Iskandar B. Khakimov\*

Institute of Technology and Innovative Management in Kulyab, Borbad st., Kulyab, 735360,  
Republic of Tajikistan  
E-mail: elita-91@mail.ru\*

Firuz A. Rakhimov

State Scientific Institution "Center for Research of Innovative Technologies" of the National Academy  
of Sciences of Tajikistan, Aini st., 299/3, Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan  
E-mail: r.f.a-040891@bk.ru

Izatullo N. Ganiev, Ziyodullo R. Obidov

Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, National Academy of Sciences of Tajikistan, Ayni st., 299/2,  
Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan  
E-mail: ganiev48@mail.ru, z.r.obidov@rambler.ru

*The article presents the results of the study of the oxidation kinetics and the anodic behavior of the zinc-aluminum alloy Zn22Al, doped with nickel, in various corrosive environments. The kinetic and energy parameters of the process of high-temperature oxidation of alloys are determined. It is shown that the process of high-temperature oxidation of samples of Zn22Al-Ni alloys is characterized by a monotonic decrease in the true oxidation rate and an increase in the effective activation energy at the content of the alloying component in the initial Zn0.5Al alloy up to 0.5 wt.%. It was found that nickel additives within the studied concentration (0.01-0.5 wt.% ) slightly increases the oxidability of the base alloy Zn22Al at temperatures of 523, 573 and 623 K. It is shown that the dependence of the corrosion potential of zinc-aluminum alloys on the nickel content in them is of the same type, i.e. the additives of the alloying component contribute to the displacement of the corrosion potential in the region of positive values. The influence of the aggressiveness of the corrosive medium on the anodic behavior of alloys when comparing concentrated electrolytes with the increasing concentration of chloride ions in the sodium chloride solution is established. It is determined that the potentials of pitting formation and repassivation of the initial alloys shift to a more positive region with an increase in the nickel concentration in the alloys. The greatest shift of these potentials to the positive region is observed when alloying alloys containing small nickel additives. It is shown that the corrosion products of the studied alloys consist of a mixture of protective oxide films  $Al_2O_3$ , ZnO, NiO,  $Al_2O_3 \cdot ZnO$  and  $Al_2O_3 \cdot Ni_2O_3$ . It was found that the alloying of zinc-aluminum alloys with nickel (in the range of 0.01–0.05 wt.%) reduces the corrosion rate of the base alloy by 2-3 times. The proposed alloy compositions can be used as an anode coating for corrosion protection of steel products and structures.*

**Key words:** Zn22Al alloy, nickel, thermogravimetric and potentiostatic method, oxidation rate, potentiodynamic regime, corrosion rate, anodic behavior

### ВВЕДЕНИЕ

Цинк-алюминиевые сплавы широко используются в различных областях техники. В связи с этим, изучению их различных свойств посвящено несколько работ [1-8] для различных целей эксплуатационного назначения. Изучены механические свойства сверхмелкозернистого эвтектоидного сплава Zn-22% Al. Показано, что существуют

стабильные равноосные ультратонкие зерна размером ~ 0,63 мкм с однородным распределением зерен Zn и Al. В настоящем исследовании оценивается пороговое напряжение как одна из возможных причин снижения чувствительности к скорости деформации сверхпластического течения при комнатной температуре в ультрамелкозернистом сплаве Zn-22% Al.

В последнее время цинк-алюминиевые сплавы стали применять в качестве защитных покрытий стальных конструкций, изделий и сооружений. Наиболее известные из них – это сплавы Zn5Al и Zn55Al, известные под торговыми марками Гальфан-I, II и Гальвалюм [9-13].

В литературе встречаются различные модификации цинк-алюминиевых сплавов, легированных третьим компонентом. В частности, в работах [14-21] показано положительное влияние ряда металлов на коррозионную устойчивость сплавов Zn0.5Al, Zn5Al и Zn55Al.

Работа посвящена исследованию влияния добавок никеля на кинетику окисления и анодное поведение сплава Zn22Al, используемого в качестве защитного покрытия стальных изделий, конструкций и сооружений горячим методом.

#### МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного материала использовали цинк марки ч.д.а., алюминий марки А7 и его лигатуры с никелем (4% Ni). Из указанных металлов были получены сплавы в тиглях из оксида алюминия в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 700-850 °С под слоем флюса состава  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и  $\text{ZnCl}_2$ , что дало возможность получить сплавы заданного стехиометрического состава. Из каждой плавки отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм, нижняя часть которых покрывалась смесью канифоли и парафина в соотношении 1:1, что позволяло во всех образцах исследовать одинаковую подготовленную площадь поверхности сплава. Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжировали, травили в 10%-ном растворе NaOH, тщательно промывали спиртом и затем погружали в раствор NaCl для исследования. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянная (20 °С) с помощью термостата МЛШ-8. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный, вспомогательным – платиновый.

Изучение влияния температуры и химического состава на кинетику окисления твердых сплавов Zn22Al, легированных никелем, проводили методом термогравиметрии с непрерывным взвешиванием образцов на воздухе по методике, описанной в работе [22]. Исследование анодного поведения цинк-алюминиевых сплавов, легированных никелем, проводилось в среде электролита 0,03, 0,3 и 3 % NaCl на потенциостате ПИ-50.1. со скоростью развёртки потенциала  $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$  по методике, описанной в работе [23].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Термогравиметрическое исследование процесса окисления сплава Zn22Al, легированного никелем различной концентрации, проводилось при температурах 523, 573 и 623 К. Результаты показывают, что легирование сплава третьим компонентом (в диапазоне 0,01-0,5 % мас.) способствует некоторому уменьшению истинной скорости окисления. При этом увеличивается величина эффективной энергии активации сплавов (табл. 1).

Таблица 1

**Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава Zn22Al, легированного никелем, в твердом состоянии**

**Table 1. Kinetic and energy parameters of the oxidation process of alloy Zn22Al with nickel in solid state**

Содержание Ni в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления ( $\text{К} \cdot 10^4$ ), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Эффективная энергия активации окисления, кДж/моль
-	473	3,00	119,5
	523	3,44	
	623	3,79	
0,01	473	2,22	130,4
	523	2,39	
	623	2,90	
0,05	473	2,18	135,6
	523	2,34	
	623	2,84	
0,1	473	2,14	144,3
	523	2,30	
	623	2,80	
0,5	473	2,09	159,7
	523	2,26	
	623	2,74	

В табл. 2 приведены результаты исследования установившейся временной зависимости потенциала коррозии для цинк-алюминиевых сплавов от концентрации никеля в трех исследуемых растворах NaCl, которые фиксировались в течение 1 ч. Наблюдается незначительное смещение потенциала в положительную область значений.

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов представлены на рис. 1. Видно, что все кривые с добавками никеля 0,01-0,5% расположены в области положительных значений потенциала по сравнению с кривой 1 для исходного сплава Zn22Al. Анодная кривая 5 для сплава Zn22Al с содержанием никеля 0,5% располагается рядом с кривой для исходного сплава, что свидетельствует о более низкой анодной скорости коррозии данного сплава (рис. 1).

Таблица 2

Изменения потенциала свободной коррозии ( $-E_{\text{св.кор.}}$ , В) сплава Zn22Al с никелем, во времени, среде электролита NaCl

Table 2. Changes in the potential of free corrosion ( $-E_{\text{v.cor.}}$ , V) of the Zn22Al alloy with nickel in time in the environment of the NaCl electrolyte

Среда NaCl, мас. %	Добавки Ni в сплаве, мас. %	Время, мин							
		1/3	2/3	2	10	20	30	45	60
0,03	-	0,982	0,961	0,955	0,933	0,929	0,925	0,920	0,920
	0,01	0,952	0,930	0,923	0,901	0,897	0,894	0,889	0,888
	0,05	0,939	0,918	0,911	0,889	0,885	0,882	0,877	0,876
	0,1	0,922	0,902	0,896	0,877	0,873	0,870	0,865	0,865
	0,5	0,915	0,895	0,889	0,868	0,864	0,860	0,855	0,854
0,3	-	1,022	1,001	0,995	0,973	0,969	0,965	0,960	0,960
	0,01	0,982	0,962	0,956	0,938	0,935	0,932	0,929	0,928
	0,05	0,967	0,948	0,943	0,927	0,924	0,921	0,917	0,917
	0,1	0,958	0,940	0,935	0,916	0,913	0,911	0,907	0,906
	0,5	0,952	0,931	0,925	0,906	0,902	0,899	0,895	0,895
3,0	-	1,051	1,027	1,021	1,004	1,000	0,997	0,993	0,993
	0,01	0,999	0,979	0,973	0,954	0,950	0,946	0,941	0,940
	0,05	0,983	0,964	0,958	0,940	0,937	0,934	0,930	0,930
	0,1	0,975	0,955	0,949	0,931	0,928	0,925	0,920	0,919
	0,5	0,961	0,940	0,935	0,919	0,916	0,914	0,910	0,910

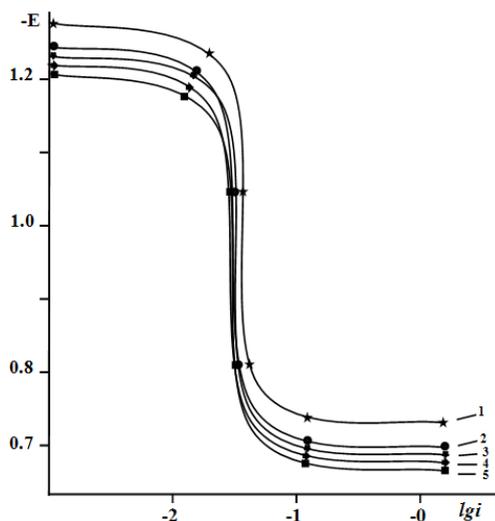


Рис. 1. Потенциодинамические анодные поляризационные (2 мВ/с) кривые сплава Zn22Al (1), содержащего никеля, мас.%, 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5) в среде электролита 3% NaCl  
Fig. 1. Potentiodynamic anodic polarization (2 mV/s) curves of the Zn22Al alloy (1) containing nickel, wt%, 0.01 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.5 (5) in an electrolyte medium 3% - NaCl

Данные табл. 3 свидетельствуют, что легирующие добавки никеля в количествах 0,01- 0,05 мас.% сдвигают коррозионно-электрохимические потенциалы сплава Zn22Al в положительную сторону. С увеличением концентрации хлорид-ионов данные потенциалы коррозии и репассивации цинк-алюминиевых сплавов, легированных никелем, уменьшаются, что указывает на снижение анодной стойкости сплавов под воздействием хлорид-ионов.

Таблица 3

Анодные характеристики сплава Zn22Al, легированного никелем

Table 3. Anodic characteristics of nickel alloy Zn22Al

Среда NaCl, мас. %	Содержание Ni в сплаве, мас. %	$-E_{\text{кор.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{реп.}}$	$i_{\text{кор.}} \cdot 10^2$
		В			
0,03	-	1,250	0,710	0,815	0,031
	0,01	1,218	0,678	0,785	0,022
	0,05	1,209	0,667	0,776	0,020
	0,1	1,199	0,656	0,767	0,024
	0,5	1,190	0,645	0,760	0,026
0,3	-	1,270	0,725	0,830	0,033
	0,01	1,236	0,690	0,797	0,024
	0,05	1,222	0,680	0,788	0,022
	0,1	1,210	0,670	0,780	0,026
	0,5	1,200	0,660	0,770	0,028
3,0	-	1,288	0,735	0,840	0,037
	0,01	1,245	0,700	0,800	0,028
	0,05	1,232	0,690	0,790	0,026
	0,1	1,220	0,680	0,782	0,030
	0,5	1,208	0,670	0,774	0,033

Механизм питтинговой коррозии цинк-алюминиевых сплавов заключается в нарушении пассивного состояния при достижении потенциала пробоя и дальнейшей коррозии в отдельных точках, которая автокаталитически поддерживается вследствие изменения состава раствора в вершине питтинга. Для цинка и алюминия высокой чистоты развитие питтингов преимущественно находится

дится в полной зависимости от ориентации кристаллографических плоскостей [5, 7].

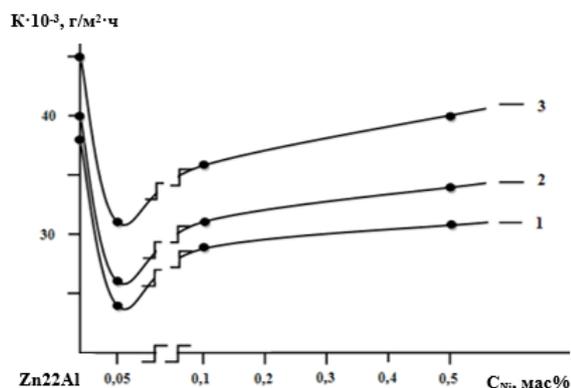


Рис. 2. Влияние содержания никеля  $c$  (мас%) на скорость коррозии  $K$  ( $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ ) сплава Zn22Al в электролитах с NaCl (%): 1 – 0,03, 2 – 0,3, 3 – 3

Fig. 2. Influence of the nickel content  $c$  (wt%) on the corrosion rate  $K$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) of the Zn22Al alloy in electrolytes with NaCl (%): 1-0.03, 2-0.3, 3-3

С ростом концентрации никеля (до 0,05 мас.%) в сплаве Zn22Al наблюдается плавное снижение скорости коррозии, дальнейшие повыше-

ние концентрации легирующего компонента незначительно увеличивает скорость коррозии базового сплава (рис. 2). Однако, все сплавы, содержащие никель, отличаются более низкой скоростью коррозии, чем исходный сплав.

Наиболее существенное влияние на питтинговость сплавов оказывает их химический состав, то есть введение в сплавы Zn22Al различной концентрации никеля приводит к росту граничных потенциалов питтинговой коррозии. Существует определенная область концентраций, в пределах которой (0,01-0,05 и 0,1-0,5% мас. Ni) легирование оказывает наиболее сильное влияние на питтинговость цинк-алюминиевых сплавов. Легированный сплав Zn22Al с никелем характеризуется наибольшей устойчивостью к питтинговой коррозии (табл. 3).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, легированные никелем цинк-алюминиевые сплавы имеют минимальное значение скорости коррозии (в 2-3 раза меньше по сравнению с базовым сплавом), и могут быть рекомендованы в качестве анодного покрытия для защиты от коррозии стальных изделий и конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maniram S.G., Singh G.M., Dehiya S., Sharma N.C. Effect of fly ash particles on the mechanical properties of Zn-22% Al alloy via stir casting method. *IOSR J. Mech. Civil Eng.* 2013. V. 10. N 2. P. 39–42.
2. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. М.: Металлургия. 1986. 247 с.
3. Obidov Z.R., Ganiev I.N., Eshov B.B., Amonov I.T. Corrosion-Electrochemical and Physicochemical Properties of Al+2.18% Fe Alloy Alloyed with Indium. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 2. P. 263–266. DOI: 10/1134/S107042721002014X.
4. Винокуров Е.Г., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Электроосаждение композиционных покрытий. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 4-38. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6212.
5. Obidov Z.R., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ganieva N.I. Corrosion of Al+2.18% Fe Alloy Doped with Gallium. *Protect. Metals Phys. Chem. of Surf.* 2011. V. 47. N 5. P. 654–657. DOI: 10/1134/S2070205111050133.
6. Меньшиков И.А., Лукьянова Н.В., Шейн А.Б. Защита стали от коррозии в кислых средах ингибиторами «Солинг» при повышенных температурах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 103-110. DOI: 10.6060/ivkkt20186100.5724.
7. Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anodic Behavior and Oxidation of the Thallium Alloyed Al+2.18% Fe Alloy. *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 11. P. 1691–1694. DOI: 10.1134/S1070427212110230.
8. Volodin V.N., Tuleushev Y.Z., Burabaeva N.M. Thermodynamics of Solutions and Azeotropy in Zinc-Calcium Melts. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. P. 1069–1076. DOI: 10.1134/S0036023620070232.

#### REFERENCES

1. Maniram S.G., Singh G.M., Dehiya S., Sharma N.C. Effect of fly ash particles on the mechanical properties of Zn-22% Al alloy via stir casting method. *IOSR J. Mech. Civil Eng.* 2013. V. 10. N 2. P. 39–42.
2. Kechin V.A., Lyblinskiy E.Ya. Zinc alloys. M.: Metallurgiya. 1986. 247 p. (in Russian)
3. Obidov Z.R., Ganiev I.N., Eshov B.B., Amonov I.T. Corrosion-Electrochemical and Physicochemical Properties of Al+2.18% Fe Alloy Alloyed with Indium. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 2. P. 263–266. DOI: 10/1134/S107042721002014X.
4. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. Electrodeposition of composite coatings. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2020. V. 63. N 8. P. 4-38 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6212.
5. Obidov Z.R., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ganieva N.I. Corrosion of Al+2.18% Fe Alloy Doped with Gallium. *Protect. Metals Phys. Chem. of Surf.* 2011. V. 47. N 5. P. 654–657. DOI: 10/1134/S2070205111050133.
6. Menshikov I.A., Lukyanova N.V., Shein A.B. Protection of steel from corrosion in acidic media at elevated temperatures by «Soling» series inhibitors. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 4. P. 103-110 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt20186100.5724.
7. Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anodic Behavior and Oxidation of the Thallium Alloyed Al+2.18% Fe Alloy. *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 11. P. 1691–1694. DOI: 10.1134/S1070427212110230.
8. Volodin V.N., Tuleushev Y.Z., Burabaeva N.M. Thermodynamics of Solutions and Azeotropy in Zinc-Calcium Melts. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. P. 1069–1076. DOI: 10.1134/S0036023620070232.

9. **Amini R.N., Irani M., Ganiev I., Obidov Z.** Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys. *Oriental J. Chem.* 2014. V. 30. N 3. P. 969–973. DOI: 10.13005/ojc/300307.
10. **Сафарова Ф.Р., Обидов З.Р., Стручева Н.Е., Ганиев И.Н., Новоженев В.А.** Высокотемпературное окисление сплава Zn5Al, легированного галлием, кислородом газовой фазы. *Ползунов. вестн.* 2019. № 3. С. 112–116. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.020.
11. **Герасименко А.А.** Об особенностях получения и преимуществах использования электрохимических покрытий сплавами цинка с оловом и молибденом. *Технологии в электрон. пром.-ти.* 2010. № 7. С. 33.
12. **Obidov Z.R.** Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn-55Al Alloy. *High Temp.* 2017. V. 55. N 1. P. 150–153. DOI: 10.1134/S0018151X17010163.
13. **Amini R.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N., Mohamad R.B.** Potentiodynamical Research of Zn-Al-Mg Alloy System in the Neutral Ambience of NaCl Electrolyte and Influence of Mg on the Structure. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2012. N 2. P. 110–114. DOI: 10.4236/jsemat.2012.22017.
14. **Obidov Z.R.** Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. N 9. P. 1451–1457. DOI: 10.1134/S1070427215090116.
15. **Amini R.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N., Mohamad R.** Anodic Behavior of Zn-Al-Be Alloys in the NaCl Solution and the Influence of Be on Structure. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2012. N 2. P. 127–131. DOI: 10.4236/jsemat.2012.22020.
16. **Обидов З.Р.** Влияние pH среды на анодное поведение сплава Zn5Al, легированного бериллием и магнием. *Изв. СПбГТИ (ТУ).* 2015. № 32 (58). С. 52–55.
17. **Obidov Z.R., Amonova A.V., Ganiev I.N.** Influence of the pH of the Medium on the Anodic Behavior of Scandium – Doped Zn55Al Alloy. *Russ. J. Non-Ferrous Metals.* 2013. V. 54. N 3. P. 234–238. DOI: 10.3103/S1067821213030115.
18. **Obidov Z.R., Ganiev I.N., Aliev D.N., Ganieva N.I.** Anodic Behavior of Zn5Al and Zn55Al Alloys Alloyed with Calcium in NaCl Solutions. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 6. P. 1015–1018. DOI: 10.1134/S1070427210060169.
19. **Obidov Z.R.** Anodic Behavior and Oxidation of Strontium-Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.* 2012. V. 48. N 3. P. 352–355. DOI: 10.1134/S2070205112030136.
20. **Obidov Z.R., Amonova A.V., Ganiev I.N.** Effect of Scandium Doping on the Oxidation Resistance of Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 87. N 4. P. 702–703. DOI: 10.1134/S0036024413040201.
21. **Обидов З.Р.** Анодное поведение и окисление сплавов Zn5Al и Zn55Al, легированных барием. *Изв. СПбГТИ (ТУ).* 2015. № 31(57). С. 51–54.
22. **Обидов З.Р., Ганиев И.Н.** Физикохимия цинк-алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами. Душанбе: ООО «Андалеб-Р». 2015. 334 с.
23. **Обидов З.Р., Ганиев И.Н.** Анодные защитные цинк-алюминиевые покрытия с элементами II группы. Берлин: LAP LAMBERT Academic Publ. 2012. 288 с.
9. **Amini R.N., Irani M., Ganiev I., Obidov Z.** Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys. *Oriental J. Chem.* 2014. V. 30. N 3. P. 969–973. DOI: 10.13005/ojc/300307.
10. **Safarova F.R., Obidov Z.R., Strucheva N.E., Ganiev I.N., Novodzhenov V.A.** High-temperature Oxidation of gallium-doped Zn5Al alloy with gaseous oxygen. *Polzunov. Vestn.* 2019. N 3. P. 112–116 (in Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.020.
11. **Gerasimenko A.A.** About Features of Reception and Advantages of use of Electrochemical Coverings of zinc alloys with tin and molybdenum. *Tekhnol. Elektron. Prom.* 2010. N 7. P. 33 (in Russian).
12. **Obidov Z.R.** Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn-55Al Alloy. *High Temp.* 2017. V. 55. N 1. P. 150–153. DOI: 10.1134/S0018151X17010163.
13. **Amini R.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N., Mohamad R.B.** Potentiodynamical Research of Zn-Al-Mg Alloy System in the Neutral Ambience of NaCl Electrolyte and Influence of Mg on the Structure. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2012. N 2. P. 110–114. DOI: 10.4236/jsemat.2012.22017.
14. **Obidov Z.R.** Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. N 9. P. 1451–1457. DOI: 10.1134/S1070427215090116.
15. **Amini R.N., Obidov Z.R., Ganiev I.N., Mohamad R.** Anodic Behavior of Zn-Al-Be Alloys in the NaCl Solution and the Influence of Be on Structure. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2012. N 2. P. 127–131. DOI: 10.4236/jsemat.2012.22020.
16. **Obidov Z.R.** Influence of the pH of the Medium on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium – Doped Zn5Al alloy. *Izv. SPbGTI (TU).* 2015. N 32 (58). P. 52–55 (in Russian).
17. **Obidov Z.R., Amonova A.V., Ganiev I.N.** Influence of the pH of the Medium on the Anodic Behavior of Scandium – Doped Zn55Al Alloy. *Russ. J. Non-Ferrous Metals.* 2013. V. 54. N 3. P. 234–238. DOI: 10.3103/S1067821213030115.
18. **Obidov Z.R., Ganiev I.N., Aliev D.N., Ganieva N.I.** Anodic Behavior of Zn5Al and Zn55Al Alloys Alloyed with Calcium in NaCl Solutions. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 6. P. 1015–1018. DOI: 10.1134/S1070427210060169.
19. **Obidov Z.R.** Anodic Behavior and Oxidation of Strontium-Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.* 2012. V. 48. N 3. P. 352–355. DOI: 10.1134/S2070205112030136.
20. **Obidov Z.R., Amonova A.V., Ganiev I.N.** Effect of Scandium Doping on the Oxidation Resistance of Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 87. N 4. P. 702–703. DOI: 10.1134/S0036024413040201.
21. **Obidov Z.R.** Anodic Behavior and Oxidation of Barium – Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Izv. SPbGTI (TU).* 2015. N 31 (57). P. 51–54 (in Russian).
22. **Obidov Z.R., Ganiev I.N.** Physicochemical of zinc-aluminium alloys with rare-earth metals. Dushanbe: ООО «Andaleb-R». 2015. 334 p. (in Tajikistan).
23. **Obidov Z.R., Ganiev I.N.** Anode protective of zinc-aluminium covering with II group elements. Berlin: LAP LAMBERT Academic Publ. 2012. 288 p. (in Germany).

Поступила в редакцию 22.01.2021  
Принята к опубликованию 22.04.2021

Received 22.01.2021  
Accepted 22.04.2021