

термоупругой модели стойки станка определить температурные деформации как по определенным координатам оси ШУ в опорных точках, так и по суммарному перемещению [3]. Тогда к угловому повороту оси шпинделя от действия силовых факторов (что приводит к прогибу шпинделя) добавятся дополнительные угловые и линейные погрешности опорных поверхностей под подшипники ШУ вследствие неравномерности нагрева стенок стойки [5]. Тогда суммарное отклонение оси шпинделя в рассматриваемом направлении примет вид

$$\delta = \Delta + (\Theta_1 + \Theta_2) \cdot a,$$

где  $\Delta$  – смещение оси шпинделя под действием тепловых деформаций передней стенки стойки станка;

$\Theta_1$  – угол поворота оси шпинделя за счет неравномерности нагрева опорных поверхностей передней и задней опоры ШУ;

$\Theta_2$  – угол поворота оси шпинделя вследствие упругой деформации консольной части,  $\Theta_2 = \text{tg } \Theta_2 = y/a$ ;

$a$  – величина консольной части шпинделя (точки приложения силы).

**Результаты.** Полученные на основании оценки термоупругой модели шпиндельного узла и экспериментальные исследования имеют хорошую сходимость, отклонения в абсолютном выражении составляют 1...2,5 мкм.

**Заключение.** Полученные моделированием теоретические исследования позволяют в зависимости от условий работы станка моделировать смещение положения оси шпиндельного узла от

внешней нагрузки, тепловых факторов, а также прогнозировать достижимую точность обработки путем выбора оптимальной конструкции и коррекции состояния станка.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3-х т. / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др.]; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994 – Т.1: Проектирование станков. – 444 с.
2. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
3. Омесь, Д.В. Моделирование тепловых деформаций стойки консольно-фрезерного станка / Д.В. Омесь, В.П. Горбунов // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. – №4(64): Машиностроение. – С. 43–46.
4. Григорьев, В.Ф. Исследование тепловых процессов в шпиндельном узле фрезерного станка / В.Ф. Григорьев, В.П. Горбунов, С.В. Архуток // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. – №4(64): Машиностроение. – С. 80–84.
5. Горбунов, В.П. Анализ тепловых деформаций стойки многоцелевого станка с числовым программным управлением / В.П. Горбунов, Д.В. Омесь // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2011. – №4(70): Машиностроение. – С. 36–39.

Материал поступил в редакцию 11.01.13

#### GORBUNOV V.P., KASYAN L.V. Modelling of shift of the axis of the spindle of the horizontally milling machine under the influence of power and thermal factors

In this work the technique of an assessment of a condition of shpindelny knot of the horizontally milling machine by modeling of impact on it power and thermal factors is considered. For linear and angular shift of an axis of a spindle researches of thermoelastic model of shpindelny knot with imposing of boundary conditions proceeding from a design and various working conditions are conducted. The received theoretical researches allow to predict shift of an axis of a spindle and if necessary to bring adjustment in a design of the machine or to change an operating mode.

УДК 546.62:620.193.4

**Строкач П.П., Яловая Н.П., Басов С.В., Халецкий В.А., Тур Э.А.**

### КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ МЕДНЕНИЯ И НИКЕЛИРОВАНИЯ

**Введение.** Для защиты от коррозии изделий из алюминия и алюминийсодержащих сплавов и придания им долговечности и декоративного внешнего вида необходимо нанести на поверхность металла защитно-декоративные или функциональные слои методом фосфатирования, хроматирования, анодирования, электрохимического осаждения металлических покрытий и др. Методы анодирования и электрохимического осаждения металлических покрытий обеспечивают более надежную защиту, но процесс анодирования требует значительных затрат электроэнергии и приводит к потере электропроводности приповерхностными слоями изделий. Этим недостатком лишен метод электрохимического осаждения металлических покрытий (например, меди, никеля) из растворов.

Варьируя химическую природу осаждаемого металла, фазовый состав сплавов и микроструктуру покрытий, можно обеспечить получение изделий широкого ассортимента, обладающих в каждом кон-

кретном случае требуемыми защитно-декоративными и функциональными свойствами. Перспективным является осаждение композиционных материалов типа металл – дисперсная фаза, например оксида, поскольку такие материалы нередко обладают повышенной твердостью, износостойкостью, коррозионной устойчивостью. Тем не менее, обеспечить осаждение металлических покрытий на алюминий или его сплавы – трудная и не решенная до настоящего времени задача, что, главным образом, связано с высокой химической активностью алюминия и частичным растворением его приповерхностных слоев в используемых электролитах. В результате этого процесса качество покрытий и их адгезия к основе ухудшаются, а электролит выходит из строя.

Основным преимуществом химического никелирования является возможность нанесения равномерного осадка на сложнопрофильные изделия. Химическое никелирование основано на восста-

**Строкач Петр Павлович, к.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.**

**Яловая Наталья Петровна, к.т.н., доцент, директор Института повышения квалификации и переподготовки кадров Брестского государственного технического университета.**

**Басов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.**

**Халецкий Виталий Анатольевич, доцент кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.**

**Тур Элина Аркадьевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.**

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

новлении ионов никеля до металла в соответствующих растворах.

Для химического никелирования применяются кислые и щелочные растворы, причем первые, как правило, обладают повышенной производительностью (до 30 мкм/ч).

Предварительная подготовка образцов для никелирования включает обезжиривание и травление. Основными трудностями, которые препятствуют широкому применению химического никелирования, являются: изменение состава электролита во времени, в результате чего уменьшается концентрация ионов никеля, накопление слаборастворимых продуктов восстановления никеля и выпадение их в осадок, что приводит к снижению скорости восстановления никеля вплоть до полного прекращения процесса. По этой причине хорошие по качеству химические никелевые покрытия получают только из свежеприготовленных растворов.

Микротвердость покрытий, полученных химическим никелированием, колеблется в пределах 400–600 кг/мм<sup>2</sup>. Отпуск химических никелевых покрытий при температуре 350–400°C способствует повышению твердости осадка до 900–1000 кг/мм<sup>2</sup>. Износостойкость таких покрытий конкурирует с износостойкостью электролитического хрома.

Получаемый химическим осаждением слой меди имеет красивый розовый цвет, который неравномерно меняется на воздухе вследствие быстрого окисления. Медные покрытия широко используют в качестве подслоя при никелировании и хромировании. В этом случае отсутствует сквозная пористость осадков, что позволяет уменьшить толщину слоя верхнего более дорогостоящего покрытия. Толщина слоя электролитической меди зависит от его назначения и обычно при декоративных и антикоррозионных покрытиях находится в пределах 5–30 мкм, при термообработке 10–20 мкм. Большинство электролитов для меднения по своему составу делятся на кислые и цианистые. Кислые электролиты отличаются стабильностью в работе и простотой состава. Основными недостатками таких электролитов являются их низкая рассеивающая способность, плохое сцепление медного осадка с подложкой и высокая пористость получаемых покрытий.

Задача осаждения на изделия из сплавов алюминия металлических покрытий, в том числе композиционных, является особенно актуальной. Предполагаемые исследования по модифицированию поверхности сплавов на основе алюминия, варьированию состава используемых электролитов и осаждению композиционных покрытий металл-ультрадисперсная фаза оксида из коллоидных растворов имеют научную новизну и представляют интерес для развития инженерии поверхности, электрохимии и гальванотехники.

Для проведения исследований по осаждению на изделия из сплавов алюминия металлических покрытий необходимо изучить сущность электрохимического поведения и пассивного состояния алюминия, исследовать коррозионную устойчивость алюминия и алюминийсодержащих сплавов в растворах электролитов.

**1. Коррозионные испытания при полном погружении в электролиты меднения и никелирования.** Изучение коррозии алюминия и алюминийсодержащих сплавов в растворах электролитов меднения и никелирования с добавкой и без добавки диоксида кремния в диапазоне концентраций от 0,5 до 2 г/л проводилось в фоновых растворах электролитов (без ионов металла) и в растворах электролитов с ионами никеля и меди, восстанавливающихся на поверхности алюминия и различных алюминийсодержащих сплавов.

Подготовка поверхности образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов включала обезжиривание их поверхности ацетоном с последующим промыванием в дистиллированной воде; взвешивание на лабораторных электронных весах OHAUS PIONEER PA214C с погрешностью ± 0,0001 г и травление, необходимое для удаления оксидной пленки, в течение 10 секунд при температуре 70°C в растворе следующего состава:

- гидроксид натрия (NaOH) – 10 г/дм<sup>3</sup>;
- нитрат натрия (NaNO<sub>3</sub>) – 5 г/дм<sup>3</sup>;
- карбонат натрия (NaCO<sub>3</sub>) – 12 г/дм<sup>3</sup>.

После травления образцы тщательно промывались в дистиллированной воде и сразу погружались в электролит.

По окончании заданного времени коррозионного испытания с поверхности образцов удалялись продукты коррозии химическим методом по ГОСТ 9.907 в растворе азотной кислоты (300 см<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>

плотностью ρ = 1,41 г/см<sup>3</sup> на 1 дм<sup>3</sup> раствора) в течение 0,1–10 минут при температуре 18–20°C. Процесс удаления продуктов коррозии контролировался визуально. Затем образцы промывались дистиллированной водой, высушивались и взвешивались, после чего проводилась изучение и микрофотографирование поверхности образцов на металлографическом микроскопе МКИ-2М-1 ПЛАНАР в диапазоне увеличения 125–1000 крат.

В соответствии с ГОСТом [1] коррозионные испытания проводились при полном погружении в электролит с добавлением пероксида водорода в емкости вместимостью 3000 дм<sup>3</sup> при постоянном перемешивании. При этом объем электролита составлял 10 см<sup>3</sup> на 1 см<sup>2</sup> поверхности образца. Исследуемые образцы алюминия и алюминийсодержащих сплавов ЦАМ и АМГ находились в различных емкостях в течение 90 сут. при температуре электролита 20°C. В испытательный раствор один раз в пять дней добавляли 0,1% раствор пероксида водорода. В течение испытаний, по мере загрязнения раствора продуктами коррозии (помутнение, выпадение осадка) электролит заменялся на новый. Одновременно проводились испытания образцов в электролите без добавки оксида кремния (IV) и с его с добавкой в диапазоне концентраций от 0,5 до 2 г/л в фоновых растворах электролитов (без ионов металла) и в растворах указанной рецептуры, с ионами никеля и меди, восстанавливающихся на поверхности алюминия и различных алюминийсодержащих сплавов.

Оценка коррозионной стойкости исследованных образцов проводилась по изменению их внешнего вида и массы.

Для качественной оценки внешнего вида при дневном свете изучались поверхности образцов на наличие потускнения поверхности, цвета продуктов коррозии, распределения коррозионных эффектов по поверхности, а также проводилась микрофотографирование их поверхности на металлографическом микроскопе МКИ-2М-1 ПЛАНАР в диапазоне увеличения 125–1000 крат

Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) по истечении заданной длительности испытаний определялось взвешиванием образца до и после коррозионных испытаний, при этом площадь поверхности образца  $S$  определялась до погружения его в электролит. Изменение массы на единицу площади поверхности образца вычисляли по формуле (1):

$$\Delta m_s = (m_2 - m_1) / S, \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса образца до испытания, г;

$m_2$  – масса образца после испытания и удаления продуктов коррозии, г;

$S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Скорость коррозии ( $K$ ), г/м<sup>2</sup>·сут., определяли по формуле (2)

$$K = \Delta m_s / \tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  – продолжительность испытаний, сут.

Результаты проведенных коррозионных испытаний образцов алюминия, АМГ и ЦАМ при полном погружении в электролиты меднения и никелирования, усредненные по пяти сериям параллельных опытов, представлены в таблицах 1.1–1.20. Визуальный контроль внешнего вида образцов показал наличие равномерного распределения продуктов коррозии на всей поверхности.

**Таблица 1.1.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения без добавки оксида кремния (IV) в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	15,3112	43,1831	41,1218
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	14,9614	43,3112	41,1113
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	15,1103	43,1236	41,1318
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	15,4101	43,7114	41,1431
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	15,1213	43,2914	41,1513
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		15,1829	43,3241	41,1319
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1687	0,4814	0,4570

**Таблица 1.2.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	14,2913	36,4113	25,4117
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	14,3211	36,2114	25,7414
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	14,1119	36,3217	25,6412
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	14,1197	36,4117	25,1714
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	14,3212	36,4612	25,1441
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		14,2330	36,3635	25,4220
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1581	0,4040	0,2825

**Таблица 1.3.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,9511	35,9811	25,0112
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,7814	36,0176	25,2214
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	14,2113	36,1127	25,1078
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	14,1714	36,1321	25,0914
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	14,1903	36,2213	25,2115
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		14,0611	36,0930	25,1287
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1562	0,4010	0,2792

**Таблица 1.4.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,7812	36,0112	25,1213
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,5136	35,9714	25,1171
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,4116	36,2101	25,3214
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,8114	36,0781	25,0911
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,1705	36,1171	25,1146
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,5377	36,0776	25,1531
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1504	0,4009	0,2795

**Таблица 1.5.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,6814	35,9711	25,4311
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,4123	36,1112	25,3112
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,5212	36,2314	25,2374
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,1141	36,1144	25,0711
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,1213	36,0112	25,0414
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,3701	36,0879	25,2184
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1486	0,4010	0,2802

**Таблица 1.6.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения без добавки оксида кремния (IV)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	16,2714	45,3117	34,1241
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	16,4126	45,0717	34,4613
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	16,3117	45,7621	34,7114
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	16,3771	45,4194	34,0711
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	16,8119	45,6417	35,0194
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		16,4369	45,4413	34,4775
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1826	0,5049	0,3831

**Таблица 1.7.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	16,9413	45,0712	34,9213
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	16,7113	46,0114	34,7314
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	16,2913	45,8231	34,8119
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	16,3714	45,7131	34,9411
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	16,6414	45,1141	34,7111
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		16,5913	45,5466	34,8234
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1843	0,5061	0,3869

**Таблица 1.8.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	15,4213	44,1712	33,1112
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	15,6114	44,2314	33,7241
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	15,9416	44,2812	32,9444
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	15,7711	44,8312	33,1884
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	15,4113	44,3312	32,1114
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		15,6313	44,3692	33,0159
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1737	0,4930	0,3668

**Таблица 1.9.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	15,2112	44,2112	33,2712
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	15,0992	43,9217	33,2111
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	15,6114	44,0112	33,3371
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	15,7714	44,3012	32,9741
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	15,4446	44,0912	33,2014
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		15,4276	44,1073	33,1990
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1714	0,4901	0,3689

**Таблица 1.10.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	15,0311	43,9412	32,9341
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	15,1131	44,4113	33,0112
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	15,7311	44,2312	33,6124
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	14,9914	44,2311	32,9984
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	15,4114	44,1112	33,2122
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		15,2556	44,1852	33,1537
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1695	0,4909	0,3684

**Таблица 1.11.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования без добавки оксида кремния (IV) в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,3211	38,0112	32,2741
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,7141	36,9914	32,7215
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,2223	37,4112	32,4117
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,4421	37,6513	32,5717
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,3112	37,7772	32,6748
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,3841	37,5685	32,5308
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1376	0,4174	0,3615

**Таблица 1.12.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,9771	37,2413	31,4472
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,7712	36,9411	31,3349
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,8884	36,9664	31,6007
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,9207	36,9886	31,2774
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,9941	37,1114	31,4413
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,9103	37,0498	31,4203
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1323	0,4116	0,3491

**Таблица 1.13.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,8261	36,8341	30,9814
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,9341	36,9217	31,1012
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,7744	36,8314	31,2311
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,7416	36,9411	31,0714
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,8212	36,8814	31,0812
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,8195	36,8819	31,0933
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1313	0,4098	0,3455

**Таблица 1.14.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,6371	36,6412	31,0112
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,8372	36,7114	31,4114
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,9914	36,8211	31,2112
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,7212	37,0112	31,1337
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,8413	36,9214	31,2212
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,7656	36,8213	31,1977
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1307	0,4091	0,3466

**Таблица 1.15.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,6122	36,5311	30,9421
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,9911	36,4432	31,2314
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,8828	35,9916	31,4226
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,9212	36,7211	31,2813
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,7641	36,4212	31,1117
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,8343	36,4216	31,1979
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1315	0,4047	0,3466

**Таблица 1.16.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования без добавки оксида кремния (IV)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	14,2712	43,2113	36,2216
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	14,0144	42,9714	36,7211
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	14,1701	43,1114	36,4415
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	14,3002	43,2416	36,6565
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	14,3141	43,3611	36,5717
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		14,2140	43,1794	36,5225
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		1,5793	0,4798	0,4058

**Таблица 1.17.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,5714	42,3912	35,9004
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,6791	42,1144	35,7261
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,7714	42,3006	35,6946
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,4112	41,9816	35,7721
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,2414	42,3912	35,6984
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,5349	42,2958	35,7583
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1504	0,4693	0,3973

**Таблица 1.18.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,3211	40,0014	33,2212
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,4711	39,6612	33,4406
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,0116	39,7217	33,2603
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,1142	39,8842	33,4790
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,3412	39,7747	33,3433
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,2518	39,7986	33,3489
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1361	0,4422	0,3705

**Таблица 1.19.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,4412	39,8112	33,4546
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,1844	39,7441	33,2114
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,2712	39,7212	33,2416
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,0711	39,9212	33,4611
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,2247	39,6936	33,1162
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,2385	39,7783	33,2970
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1360	0,4420	0,3700

**Таблица 1.20.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при полном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,3212	39,9211	32,9411
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,4211	39,7312	33,2113
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,1144	39,4211	33,0711
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,3415	39,3412	33,1416
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,2514	39,1234	33,1617
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,2900	39,3076	33,1054
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1366	0,4368	0,3678

**2. Результаты испытаний при переменном погружении в электролиты меднения и никелирования.** Поскольку многие металлические изделия, в том числе изготовленные из алюминийсодержащих сплавов, в процессе эксплуатации подвергаются периодическому смачиванию электролитами, то очевидно, что подобные условия лучше всего имитируются при испытаниях методом переменного погружения в электролит, чем испытания при полном погружении.

В настоящем исследовании для испытаний образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролиты меднения и никелирования использовалась изготовленная авторами на основе часового механизма автоматическая установка типа «коррозионное колесо» [31].

Одновременно проводились испытания образцов в электролитах меднения и никелирования без добавки оксида кремния (IV) и с его с добавкой в диапазоне концентраций от 0,5 до 2 г/л в фоновых растворах электролитов (без ионов металла) и в растворах указанной рецептуры, с ионами никеля и меди, восстанавливающихся на поверхности алюминия и различных алюминийсодержащих сплавов.

Режимы испытаний при переменном погружении в электролит соответствовали принятым в ГОСТ 9.913-90 и стандарте ИСО 11130 [1]: время одного полного цикла испытаний – 60 мин.; время погружения – 10 мин.; время между погружениями – 50 мин.

Количество циклов испытаний для каждого типа образца составило 90 суток.

Результаты проведенных коррозионных испытаний образцов алюминия, АМГ и ЦАМ при переменном погружении в электролит, усредненные по пяти сериям параллельных опытов, представлены соответственно в таблицах 2.1–2.20.

Визуальный контроль внешнего вида образцов показал наличие равномерного распределения продуктов коррозии на всей поверхности.

**Таблица 2.1.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения без добавки оксида кремния (IV) в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,4567	41,8313	38,0818
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,9142	41,1276	38,1035
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,1037	41,3608	38,3018
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,9841	41,1014	38,1431
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,1345	41,9434	38,3513
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,1186	41,4729	38,1963
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1458	0,4608	0,4244

**Таблица 2.2.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,9134	34,0113	23,0117
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	12,2011	34,1514	23,7004
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,1019	34,2017	23,0512
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,1907	34,9117	23,1064
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,2012	34,6012	23,4044
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,3217	34,3755	23,2548
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1369	0,3720	0,2584

**Таблица 2.3.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	12,0511	33,8511	23,0712
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,8914	33,0376	23,0214
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	12,2113	33,2712	23,0738
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	12,1704	33,3021	23,0904
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	12,0339	33,2013	23,1013
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		12,0716	33,3327	23,0716
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1341	0,3704	0,2564

**Таблица 2.4.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,0782	33,0512	23,0213
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,3136	32,7214	23,1371
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,1016	33,0122	23,0214
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,8914	33,1781	23,1913
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,7105	33,2172	23,0106
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,4191	33,0360	23,0763
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1269	0,3671	0,2564

**Таблица 2.5.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,3824	32,7911	23,0311
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,0413	33,0113	23,2612
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,8212	33,0314	23,0374
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,4001	33,2404	23,1114
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,2103	33,1012	23,0412
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,3711	33,0351	23,0965
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1264	0,3671	0,2566

**Таблица 2.6.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения без добавки оксида кремния (IV)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,7014	42,0317	31,2041
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,1026	42,0607	31,6012
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,1417	42,6021	32,0114
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,0772	42,1904	31,7011
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,1819	42,0347	31,1034
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,2410	42,1839	31,5242
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1471	0,4687	0,3503

**Таблица 2.7.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,8433	42,0602	31,8213
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,0133	42,0114	31,6314
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,0813	42,2851	31,5118
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,7014	42,1031	31,6401
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,5404	42,3141	32,0012
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,4359	42,1548	31,7212
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1493	0,4684	0,3525

**Таблица 2.8.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,2013	41,7012	30,1012
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,4104	41,3014	30,4221
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,3106	41,3212	29,9344
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,6711	41,6312	30,2884
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,4112	41,4302	30,0112
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,4009	41,4770	30,1515
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1489	0,4609	0,3350

**Таблица 2.9.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,1012	41,1012	31,7012
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,0922	41,0927	31,1031
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,6014	41,0212	31,3071
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,7014	41,0812	30,9751
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,4046	41,0813	31,0514
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,3802	41,0755	31,2276
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1487	0,4564	0,3469

**Таблица 2.10.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит меднения с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	13,0511	41,9432	29,9301
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	13,1031	42,3113	30,0217
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	13,3311	42,3412	30,1124
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	13,8194	42,4611	30,1849
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	13,2114	42,3113	30,1022
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		13,3032	42,2736	30,0702
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1478	0,4697	0,3411

**Таблица 2.11.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования без добавки оксида кремния (IV) в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	10,2011	33,0312	29,7541
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	10,1841	32,9974	29,6215
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	10,2377	33,1712	30,0041
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	10,42105	33,5713	29,5707
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	10,2312	33,3772	29,5718
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		10,2550	32,2284	29,7044
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1139	0,3580	0,3390

**Таблица 2.12.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	9,9701	34,2213	29,3472
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	9,7412	33,9401	29,3049
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	9,3884	33,8664	29,6107
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	9,7207	33,8686	29,7074
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	9,5941	34,6114	29,4013
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		9,6829	34,1015	29,4735
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> -сут.		0,1075	0,3789	0,3275

**Таблица 2.13.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	9,7261	33,3441	28,9814
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	9,3941	33,2917	29,1312
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	9,7144	32,9834	29,1301
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	9,4016	33,4011	29,0784
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	9,2912	33,1433	28,8912
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		9,5054	33,2327	29,0424
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,156	0,3692	0,3226

**Таблица 2.14.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	9,4371	33,4612	29,0512
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	9,3792	33,4114	28,8814
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	8,9817	33,6211	29,0112
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	9,2012	33,1712	29,1307
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	9,1003	32,9417	29,1913
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		9,2199	33,3213	29,0531
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1024	0,3702	0,3228

**Таблица 2.15.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л в фоновом растворе электролита (без ионов металла)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	9,5123	33,4301	28,9621
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	9,8911	33,6432	29,3314
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	9,9807	33,8926	29,2726
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	9,0152	33,6203	29,3813
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	9,6601	33,5292	29,1816
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		9,6118	33,6230	29,2258
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1067	0,3735	0,3247

**Таблица 2.16.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования без добавки оксида кремния (IV)

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,3712	40,3115	33,1816
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,1146	39,9704	33,6211
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,2017	40,2104	33,4715
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	10,8902	40,1406	33,6505
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,3181	40,2656	33,6727
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,1791	40,1797	33,5194
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1242	0,4464	0,3724

**Таблица 2.17.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 0,5 г/л в

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	11,4714	39,2902	32,8114
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	11,4701	38,9814	32,6201
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	11,6704	39,0046	32,5936
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	11,5122	39,1623	32,6721
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	11,2914	39,1912	32,5984
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		11,4831	39,1259	32,6591
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1276	0,4347	0,3628

**Таблица 2.18.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	10,4211	38,0314	30,0211
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	10,4311	37,6612	30,2405
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	10,2106	37,7216	30,1602
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	10,2102	37,5802	30,3690
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	10,5412	37,6747	30,2433
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		10,3628	37,7338	30,2122
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1151	0,4192	0,3357

**Таблица 2.19.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 1,5 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	10,3412	36,5112	29,8546
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	10,1644	36,6001	30,0214
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	10,2112	36,7412	30,2406
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	10,0611	36,8233	30,1612
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	10,2547	36,5906	30,1133
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		10,2065	36,5812	30,0782
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1134	0,4064	0,3342

**Таблица 2.20.** Изменение массы  $\Delta m_s$  (г/м<sup>2</sup>) образцов алюминия и алюминийсодержащих сплавов при переменном погружении в электролит никелирования с добавкой оксида кремния (IV) 2,0 г/л

Образец		Алюминий	АМГ	ЦАМ
№ серии испытаний	$\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>			
1	$\Delta m_s$ 1 г/м <sup>2</sup>	10,3212	36,7211	29,9611
2	$\Delta m_s$ 2 г/м <sup>2</sup>	10,2411	36,6312	30,2003
3	$\Delta m_s$ 3 г/м <sup>2</sup>	10,3144	36,5421	30,0613
4	$\Delta m_s$ 4 г/м <sup>2</sup>	10,2415	36,6402	30,1006
5	$\Delta m_s$ 5 г/м <sup>2</sup>	10,2514	36,6234	30,1017
Среднее изменение массы по 5 сериям испытаний $\Delta m_s$ , г/м <sup>2</sup>		10,2739	36,6316	30,0850
Скорость коррозии $K$ , г/м <sup>2</sup> ·сут.		0,1141	0,4070	0,3343

Визуальный контроль внешнего вида и микрофотографическое изучение образцов показали наличие равномерное распределение продуктов коррозии на всей поверхности, аналогичное образцам, исследованным при полном погружении в электролиты никелирования и меднения.

**Заключение.** Изучение процессов коррозии алюминия и алюминийсодержащих сплавов в растворах пирофосфатных электролитов меднения и никелирования с добавкой и без добавки диоксида кремния в диапазоне концентраций от 0,5 до 2 г/л и сравнение коррозионного действия фоновых растворов электролитов без ионов металла и аналогичных растворов с ионами никеля и меди, восстанавливающихся на поверхности алюминия и алюминийсодержащих сплавов, было установлено, что:

1) при полном и переменном погружении алюминия и алюминийсодержащих сплавов в пирофосфатные электролиты меднения и никелирования наблюдается относительно высокая коррозионная активность. При этом пирофосфатные электролиты никелирования менее коррозионно агрессивны, чем электролиты меднения;

2) наиболее устойчивыми являются образцы из чистого алюминия. Скорость разрушения сплава АМГ несколько выше, чем сплава ЦАМ, как в фоновых растворах электролитов без ионов металла, так и в аналогичных растворах с ионами никеля и меди, восстанавливающихся на поверхности алюминия и различных алюминийсодержащих сплавах;

3) ультрадисперсные частицы оксида кремния  $\text{SiO}_2$  в диапазоне концентрации 1–2 г/л оказывают некоторое стабилизирующее воздействие на коррозионную стойкость как алюминия, так и исследованных образцов алюминийсодержащих сплавов (АМГ и ЦАМ) в пирофосфатных электролитах меднения и никелирования, однако механизм стабилизирующего воздействия требует дальнейшего исследования.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магниевые и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний: ГОСТ 9.913-90.
2. Строкач, П.П. Коррозионная стойкость алюминийсодержащих сплавов при полном и переменном погружении в пирофосфатный электролит. // П.П. Строкач, Н.П. Яловая [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2011. – № 4(70): Машиностроение. – С. 63–66.
3. Справочник химика: в 6 т. / Редкол. Б.П. Никольский (гл. ред.) [и др.] – Л.: Гос. научн.-техн. изд-во, 1962-1966. – 2-е изд., перераб. и доп. – Т.5. – 1966. – С. 862-864.
4. Семёнова, И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семёнова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов; под ред. И.В. Семёновой. – М.: Физматлит, 2002. – С. 200–203.
5. Генель, Л.С. Концентрат противокоррозионных и окрашивающих добавок для теплоносителей на основе пропиленгликоля / Л.С. Генель, М.Л. Галкин, С.С. Сорокин // Полимерные материалы. – 2006. – № 4. – С. 83–85.
6. Электрокотел в системе отопления // Мастерская: строим дом. – 2011. – № 2. – С. 76–82.
7. Басов, С.В. Исследование изменения состава и свойств при эксплуатации экологически полноценного теплоносителя для электродных отопительных котлов малой и средней мощности / С.В. Басов, В.А. Халецкий, Э.А. Тур // Вестник БрГТУ. – 2011. – № 2(68): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 51–53.
8. Мискун, В. Опыт применения электродных котлов / В. Мискун // Аква Терм. – 2004. – № 2. – С. 22–24.
9. Левин, А.И. Теоретические основы электрохимии / А.И. Левин. – М.: Металлургия, 1972. – 544 с.

10. Голубев, А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов / А.И. Голубев. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 86 с.
11. Акимов, Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов / Г.В. Акимов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 224 с.
12. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1969. – 512 с.
13. Палеолог, Е.Н. Электродные потенциалы алюминия с защитной пленкой разной толщины / Е.Н. Палеолог, Г.В. Акимов. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 160 с.
14. Акимов, Г.Б. Электрохимическое поведение алюминия в растворах с различными анионами / Г.Б. Акимов, Е.Н. Палеолог. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 220 с.
15. Эванс, Ю.Р. Коррозия и окисление металлов / Ю.Р. Эванс. – М.: Наука, 1962. – 368 с.
16. Кабанов, Б.Н. Электрохимия металлов и адсорбция / Б.Н. Кабанов. – М.: Наука, 1984. – 198 с.
17. Шрейдер, А.В. Коррозионная стойкость и применение алюминиевых сплавов на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах для изготовления конденсационно-холодильного и теплообменного оборудования / А.В. Шрейдер, Г.Л. Черепанова. – М.: ЦНИИТЭ, Нефтехим, 1985. – 144 с.
18. Акользин, П.А. Предупреждение коррозии металла паровых котлов / П.А. Акользин. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
19. Акимов, Г.В. Влияние температуры на скорость коррозии алюминия и некоторых алюминиевых сплавов / Г.В. Акимов, В.В. Романов. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 258 с.
20. Хитров, Б.А. О влиянии температуры на коррозионную стойкость алюминия в кислых средах / Б.А. Хитров, В.И. Шаталова // ЖПХ. Т. 34, вып.5. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 149–154.
21. Лукашев, Е.А. Электрохимическая коррозия / Е.А. Лукашев, Г.Н. Лукашева, И.П. Соколов. – М.: МГУС, 2002. – 68 с.
22. Герасимов, В.В. Коррозия алюминия и его сплавов / В.В. Герасимов. – М.: Металлургия, 1967. – 468 с.
23. Томашов, Н.Д. Пассивность и защита металлов от коррозии / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 188 с.
24. Ярославский, З.Я. Исследования работы электролитических коагуляторов небольшой производительности / З.Я. Ярославский // В тр. ВНИИГ: т. 45. – М.: Колос, 1965. – С. 108-115.
25. Фомин, Г.С. Коррозия и защита от коррозии. Энциклопедия международных стандартов / Г.С. Фомин. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 443 с.
26. Vargel, C. Corrosion of aluminium / C. Vargel. – Amsterdam Elsevier, 2004. – 626 p.
27. Ghali, E. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing (Wiley Series in Corrosion) / E. Ghali. – London: Wiley, 2010. – 719 p.
28. Фрейман, Л.И. Коррозия металлов // Химическая энциклопедия: в 5 т. / Редкол.: И.Л. Кнунянц [и др.] – М.: Сов. энцикл. – Т. 2. – 1990. – С. 952–956.
29. Рачев, Х. Справочник по коррозии: пер. с болг. / Перевод С.И. Нейковско; под ред. Н.И. Исаева. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
30. Строкач, П.П. Оценка коррозионной стойкости алюминийсодержащих сплавов в пирофосфатных электролитах / П.П. Строкач, Т.Н. Воробьева, Н.П. Яловая, С.В. Басов, А.П. Головач // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: сборник материалов Республ. науч.-техн. семинара, Минск, 6–7 декабря 2011 г. / БГТУ. – Минск, 2011. – С. 98–101.

Материал поступил в редакцию 08.02.13

#### STROKACH P.P., YALOVAYA N.P., BASOV S.V., HALETSKY V.A., TUR E.A. Corrosion behavior of aluminum and aluminum-bearing alloys in medneniye and nickel plating electrolytes

Processes of corrosion of aluminum and aluminum-bearing alloys in solutions of pirofosfatny electrolytes of a medneniye and nickel plating with an additive and without an additive of dioxide of  $\text{SiO}_2$  silicon in the range of concentration from 0,5 to 2 g/l are studied, and comparison of corrosion effect of background solutions of electrolytes without ions of metal and similar solutions with ions of nickel and the copper which is restoring on a surface of aluminum and aluminum-bearing alloys is carried out.