

УДК 620.1938:669.715

*Е.А. Варченко¹, П.Ф. Киричок¹***ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТЕ. Часть 2***

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-105-114

Морская вода – одна из наиболее распространенных и коррозионно-агрессивных сред с тонко сбалансированным раствором солей, содержащим, в том числе, органику, живые организмы и растворенные газы, что обуславливает многофакторность условий экспозиции.

Данная работа посвящена оценке продуктивности морской биоты в шести мониторинговых точках акватории Геленджикской бухты и прибрежных участков открытого моря с количественной оценкой обрастателей и механических свойств образцов алюминиевого сплава АМгб с биообрастанием и без него в период летней экспозиции.

Ключевые слова: биокоррозия, коррозия в морской воде, Геленджикская бухта, натурные климатические испытания.

*Е.А. Varchenko¹, P.F. Kirichok¹***RESEARCH OF THE BIOLOGICAL AND CORROSION RESISTANCE OF SAMPLES OF ALUMINUM ALLOY AFTER NATURAL TESTS IN THE GELENJIK BAY. Part 2**

Sea water – one of the most common and corrosive environments, being a finely balanced salt solution containing, among other things, organics, living organisms and dissolved gases, which leads to the multifactorial nature of this exposure condition.

This work is devoted to assessing the productivity of marine biota in 6 monitoring points of the Gelendzhik bay and coastal high seas with a quantitative assessment of fouling and mechanical properties of samples of aluminum alloy AMg6 with and without biofouling during the summer exposure.

Keywords: biocorrosion, corrosion in sea water, Gelendzhik bay, full-scale climatic tests.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Получение сведений о стойкости материалов к воздействию внешних факторов позволяет повысить экономическую эффективность использования изделий и конструкций путем снижения затрат на проведение ремонта и восстановления в процессе эксплуатации в результате воздействия внешних факторов окружающей среды [1–3].

Общемировой экономической ущерб от морской коррозии и биообрастания поверхности металлических изделий и конструкций превышает 50 млрд долларов в год. Снижение этого вида затрат путем исследования биообрастания и коррозии в морской воде, поиск эффективных средств защиты приобретают особую актуальность [4].

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ» №6-7 (89), 2020.

Морская вода содержит от 1 до 3,8% (по массе) легкорастворимых солей и поэтому обладает высокой электрической проводимостью. Верхние слои морской воды, кроме того, хорошо аэрированы и содержат до 0,04 г/л кислорода. Движущиеся в аэрированной морской воде детали (винты, борта судов, рабочие колеса насосов и пр.), помимо непосредственно коррозии под действием морской воды, также подвержены воздействию эрозии и кавитации. Не менее важна роль биологического фактора – обрастания подводной части металлических конструкций морскими организмами растительного и животного происхождения [5].

Появление некоторых из них, например *Balanus improvises*, разрушает защитные покрытия, приводит к неравномерной аэрации корродирующей поверхности и возникновению коррозии. Некоторые микроорганизмы в процессе фотосинтеза выделяют кислород, что ускоряет и облегчает процесс коррозии. Однако в ряде случаев наличие на поверхности металла биологических организмов может тормозить коррозионный процесс. Так, обрастание стали мидиями снижает скорость коррозии, что связано со значительным потреблением кислорода этими моллюсками и, как следствие, снижением его концентрации у поверхности корродирующего металла [6].

Несмотря на разработку новых коррозионностойких сплавов и методов их защиты, добиться полной защиты от коррозии материалов, механизмов и конструкций в настоящее время не представляется возможным и требует дальнейшего изучения и исследований. Например, изучение случаев коррозии металлов, сплавов и металлических изделий в морской воде показывает, что очень часто причина коррозии заключается в конструкционных особенностях и в условиях эксплуатации, при этом важную роль играет выбор применяемого металла и/или сплава [7].

Данная работа посвящена оценке продуктивности морской биоты в акватории Геленджикской бухты и прибрежных участков открытого моря с количественной оценкой обрастателей и механических свойств образцов алюминиевого сплава АМг6 после летней экспозиции в шести мониторинговых точках прибрежной зоны г. Геленджика, в том числе в сравнении с результатами исследований стойкости сплава АМг6 в естественной морской воде при исключении биологического фактора.

Данная работа является продолжением первой части статьи, посвященной исследованию биомов и степени биообрастания экспонируемых образцов.

Материалы и методы

Многолетний опыт применения алюминия и его сплавов в морских условиях показал его высокую стойкость к коррозии. Коррозионная стойкость напрямую связана с типом легирования. При современном уровне знаний в области металлургии алюминиевых сплавов, невозможно использовать их в военно-морском строительстве без специальной защиты [7].

Анализ нормативной документации в области морских испытаний алюминиевых сплавов, например, таких как европейские стандарты EN 13195-1, ASTM G66-99, ASTM B924-04, а также ГОСТ 9.909–68 и стандарт ISO 11306, позволил установить следующие основные требования к данным испытаниям:

- алюминиевые сплавы должны быть изготовлены в виде полуфабриката в форме листа, полосы или пластины, чтобы оценить их устойчивость к межкристаллитной и расслаивающей коррозии;
- должен быть обеспечен постоянный равномерный доступ морской среды к испытываемым образцам со всех сторон;
- испытания должны проводиться при отсутствии соприкосновения образцов между собой и/или с другими металлами и сплавами.

Испытания материалов в морской воде принято разделять на стендовые, лабораторные и натурные, при этом следует учитывать, что только натурные испытания позволяют получить наиболее достоверные сведения о поведении материалов в естественных условиях и должны учитываться при выборе материалов и средств защиты изделий в предполагаемых условиях эксплуатации [8].

На основании регламентирующих нормативных документов для проведения испытаний были выбраны образцы из листа алюминиевого сплава АМг6 толщиной 2 мм размером 180×180 мм.

Испытания проводили в натуральных условиях в шести мониторинговых точках акватории Геленджикской бухты и ближайших прибрежных районов при постоянном полном погружении в морскую воду (рис. 1) при соблюдении следующих условий:

- вертикальное погружение образцов в морскую воду на глубину до 2 м;
- исключение взаимодействия образцов между собой и/или с другими металлическими материалами.

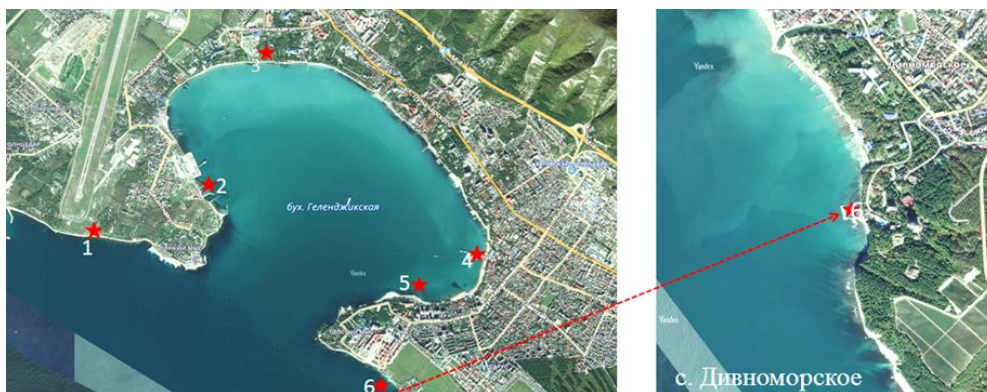


Рис. 1. Мониторинговые точки в акватории Геленджикской бухты для оценки локальной коррозионной агрессивности

С целью исключения влияния биологического фактора на коррозионную стойкость алюминиевого сплава проведены также лабораторные испытания, при которых образец из сплава АМг6 погружали в предварительно подготовленную морскую воду (воду нагревали до 65–70 °С, до и после нагрева определяли соленость, при необходимости соленость доводили до начальных значений) для исключения (максимального подавления) влияния живых организмов.

Общая продолжительность испытаний составила 3 мес (летний период 2019 г.).

Испытания на растяжение проводили на испытательной установке Zwick Z100 при постоянном осевом растяжении с постоянной скоростью (по ГОСТ Р 1497–84).

Средние значения механических свойств исходных образцов из листа сплава АМг6 толщиной 2 мм после испытаний на растяжение следующие:

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
335	173	17,7

Оценку глубины питтинговой коррозии проводили на образцах после коррозионных испытаний с удаленными продуктами коррозии (по ГОСТ 9.907–2007) на микроскопе Olympus LEXT по ГОСТ 9.908–85 с определением максимальной глубины проникновения коррозии.

Оценку глубины межкристаллитной коррозии проводили после предварительного изготовления микрошлифов в поперечном сечении образца с исследованием на металлографическом микроскопе Olympus GX51 по ГОСТ 9.908–85 и по ГОСТ 9.021–74.

Для оценки влияния на коррозионные процессы один раз в неделю проводили фиксацию параметров морской воды в каждой мониторинговой точке: температуру и соленость воды, ее плотность, количество растворенного кислорода и концентрацию ионов $(\text{NH}_4)^+$, K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} ; pH среды.

Определение ионного состава в мониторинговых точках Геленджикской бухты проводили с применением системы капиллярного электрофореза «Капель 105М». Метод основан на предварительной подготовке проб, состоящей в фильтрации, проверке значения pH, при необходимости разбавлении пробы морской воды дистиллированной водой, с последующим разделением, идентификацией и определением массовой концентрации ионов методом капиллярного электрофореза, с использованием предварительно установленных градуировочных характеристик. Косвенное детектирование компонентов проводили при длине волны 374 нм для анионов и 267 нм – для катионов.

Массу образцов измеряли с точностью до $\pm 0,001$ г на электронных весах AND GF-1000. Скорость коррозии определяли согласно ГОСТ 9.908–85 по формуле

$$V_{\text{кор}} = \frac{m_0 - m}{S \cdot n}, \quad (1)$$

$V_{\text{кор}}$ – скорость коррозии, г/(м²·сут); m_0 – исходная масса образца, г; m – масса образца после снятия продуктов коррозии, г; S – площадь образца, м²; n – продолжительность экспозиции, сут.

Результаты и обсуждение

Оценку влияния биообрастателей на коррозионные процессы, протекающие в естественной морской воде, проводили на основании потери массы металлических пластин (скорости коррозии), металлографического анализа и потерь механических свойств алюминиевого сплава при испытаниях на растяжение по сравнению с аналогичными результатами после экспозиции в лабораторных условиях. Проводили также оценку степени и массы биообрастания, определение вида основного обрастателя. Результаты оценки обрастателей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки обрастателей, зафиксированных на пластинах из сплава АМг6, после испытаний в морской воде в летний период

Условный номер точки экспозиции	Масса биообрастания, г/м ²	Степень биообрастания, %	Основной обрастатель
1	105,3	100	Водоросли <i>Cystoseira sp.</i> , <i>Gelidium sp.</i> и <i>Cladophora sp.</i> , тип <i>Bryozoa</i> , <i>Balanus improvises</i>
2	89,2	85	Тип <i>Bryozoa</i>
3	225,3	100	Водоросли <i>Cystoseira sp.</i> , <i>Gelidium sp.</i> и <i>Cladophora sp.</i> , тип <i>Bryozoa</i>
4	529,0	100	<i>Balanus improvises</i>
5	116,4	100	Водоросли <i>Cystoseira sp.</i> , <i>Gelidium sp.</i> , <i>Ulva intestinalis</i> , <i>Zostera sp.</i> , <i>Cladophora sp.</i> , а также тип <i>Bryozoa</i> и др.
6	98,8	100	Водоросли <i>Cystoseira sp.</i> , <i>Gelidium sp.</i> , <i>Cladophora sp.</i> , тип <i>Bryozoa</i> , <i>Balanus improvises</i>
Лабораторные условия	–	–	Отсутствует

Значения параметров ионного состава в мониторинговых точках Геленджикской бухты, определенные методом капиллярного электрофореза, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения параметров морской воды в летний период

Показатель	Значения показателей при экспозиции							в лабораторных условиях
	в натуральных условиях (номер мониторинговой точки)							
	1	2	3	4	5	6		
Соленость, ‰	18,2	18,2	18,3	18,3	18,4	18,7	19,5	
Температура воды, °С	24,1	24,0	24,3	24,4	24,3	24,6	21,1	
рН, усл. ед.	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	
Концентрация ионов, мг/л	(NH ₄) ⁺	Не обнаружено						
	K ⁺	112,1	117,3	137,1	124,7	120,9	95,1	149,3
	Na ⁺	3990,0	3966,1	3866,0	4023,7	4008,1	3999,6	4429
	Mg ²⁺	468,8	488,9	478,3	499,7	490,6	499,2	552,1
	Ca ²⁺	45,8	49,8	48,5	79,5	75,6	54,0	52,1
	Cl ⁻	8787,1	9133,3	9111,7	9280,1	9147,3	9362,7	10410
	SO ₄ ²⁻	1201,5	1294,0	1237,6	1318,6	1280,6	1304,9	1226
Растворенный кислород, мг/л	9,64	10,67	9,40	10,29	10,05	10,03	8,45	
Скорость течения*, см/с	1	0	0	0	0	1	0	
Биота:								
фауна	0	0	1	1	0	0	0	
флора+фауна	1	1	0	0	1	1	–	

* Факторы скорости течения воды и биоты учтены как наличие (1) и отсутствие (0).

Данные, полученные в результате расчета скорости коррозии по ГОСТ 9.908–85, представлены на рис. 2.

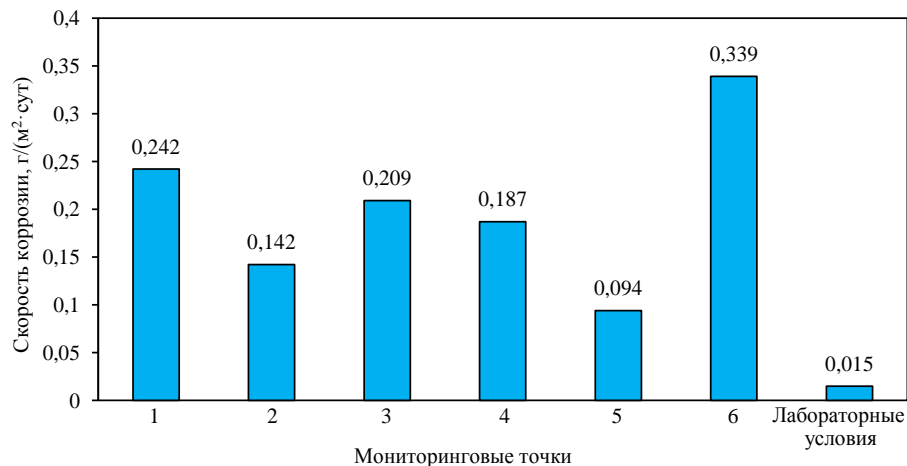


Рис. 2. Скорость коррозии образцов из сплава АМг6 после экспозиции в летний период в мониторинговых точках и лабораторных условиях

Из полученных данных следует, что в результате биообрастания скорость коррозии пластин из сплава АМг6, находящихся на экспозиции в акватории Геленджикской бухты и ближайшей к ней акватории открытого моря, повышается в сравнении с лабораторными условиями в среднем в 13 раз. Подобный рост значений скорости коррозии связан с разрушением защитной оксидной пленки алюминиевого сплава в результате жизнедеятельности биомов. В результате того, что обрастание поверхности проходило относительно равномерно, отмечено также отсутствие ярко выраженных локальных

коррозионных поражений. В ходе металлографического анализа установлено, что пластины из сплава АМгб после 3 мес экспозиции в морской воде не подвержены межкристаллитной коррозии, отмечены одиночные питтинговые коррозионные поражения, глубина которых варьируется в пределах 48–152 мкм – для образцов после натуральных испытаний и 21 мкм – для образцов, экспонируемых в лабораторных условиях. Такое коррозионное поведение объясняется тем, что в отличие от солей меди (или ртути), соли алюминия не токсичны для живых организмов, поэтому они могут легко прикрепляться к алюминиевым поверхностям, где будут расти без контроля, если их не вытеснить. При этом биом вызывает заметную коррозию металла, создает своеобразную биопленку, экранирующую металл от доступа кислорода и приводит к разрушению оксидной пленки. Таким образом, гидратированный глинозем дополнительно препятствует взаимодействию металла с морской водой или атмосферной влагой. Поэтому скорость точечной коррозии на алюминии и его сплавах очень быстро уменьшается в большинстве сред, включая морскую воду, и измерения глубины питтинга, проводимые через равные промежутки времени, показали, что скорость точечной коррозии v является фактором времени t по уравнениям типа [7]

$$v = K \cdot t^{1/3}. \quad (2)$$

Следует отметить, что весовой показатель не всегда удобен, особенно если сравнивается коррозия металлов разной плотности или возможны механические повреждения образцов в ходе экспозиции. В таких случаях лучше пользоваться глубинным показателем коррозии, т. е. средней глубиной проникновения питтинга в металл. Например, механические повреждения образцов, экспонированных в акватории мониторинговой точки 6, в результате штормового волнения моря привели к увеличению значений скорости коррозии по сравнению со значениями, полученными после экспонирования в акватории мониторинговой точки 1 (в обоих случаях экспонирование проходило за пределами Геленджикской бухты – «открытое» море) в 1,5 раза.

Проведение натурной экспозиции показало, что максимальные значения скорости коррозии получены в точках, относящихся к «открытому» морю (мониторинговые точки 1 и 6), несколько снижаясь к географическому центру бухты (мониторинговые точки 3 и 4); наименьшие же значения получены в точках 2 и 5, расположенных на внутренних сторонах мысов бухты. В первом приближении можно выявить следующие взаимосвязи градаций степени обрастания, коррозионных потерь и концентрации ионов в морской воде:

– минимальные потери механических свойств соответствуют минимальным концентрациям ионов в морской воде (кроме K^+);

– высокая степень биообрастания представителями рода *Balanus improvises* в точке 4 соответствует наибольшей степени загрязнения горюче-смазочными материалами в данной точке;

– для остальных точек (кроме точки 4) наблюдается обратная зависимость – минимальная степень обрастания соответствует максимальной концентрации ионов;

– большая степень обрастания пластин из сплава АМгб соответствует меньшим коррозионным потерям (наиболее четко прослеживается по глубине питтинговой коррозии), что объясняется образованием изолирующего слоя обрастателей, препятствующих доступу растворенного кислорода к поверхности металла.

Одним из факторов, влияющих на степень осаждения и возможность закрепления на поверхности подводных объектов и развитие обрастателей, является скорость течений. Согласно Лоции Черного моря, а также научно-техническим литературным данным [7–9], выделяют три характерные области с различным режимом течений:

– прибрежную, с очень изменчивым характером течений, со скоростью до 20–30 см/с;

- зону основного Черноморского течения, имеющего струйный характер, шириной до 40–80 км со скоростью 40–50 см/с, достигающей значений 1–1,5 м/с;
- область открытого моря, где скорость течения монотонно уменьшается от периферии к центру, не превышая 5–15 см/с.

По оценкам сезонного хода скорости течения на основе данных измерений на автономных буйковых станциях (АБС) у побережья сезонный минимум относят к началу лета (май–июнь), а максимум – к декабрю–январю [10]. Ввиду того, что экспонирование образцов проводилось в прибрежной зоне, то можно сделать вывод, что во время проведения испытаний в летний период скорость прибрежного течения была незначительна, что способствовало большей степени осаднения и закрепления биообрастателей на поверхности образцов в сравнении с осенним периодом.

Представляет интерес информация о влиянии аэрации коррозионной среды и биомов на механические характеристики сплава АМг6 [11–17]. Для определения данного влияния после экспонирования из пластин алюминиевого сплава было изготовлено по 6 образцов для проведения испытаний на растяжение.

Исследования показали, что разрушение образцов в зависимости от условий экспонирования происходит при различных нагрузках: предел прочности листа из алюминиевого сплава АМг6 в исходном состоянии (до проведения коррозионных испытаний) составляет 335 кН, после испытаний при полном погружении в морскую воду с исключением биообрастания (лабораторные условия): 334,2 МПа, а после натуральных испытаний 309,2–325 МПа. Потери предела текучести для данного сплава после экспозиции составили 6,2% в случае лабораторных условий и 7,3–9,8% – для образцов после экспозиции в натуральных условиях в мониторинговых точках.

Для анализа полученных результатов использован метод факторного эксперимента (табл. 3) [18, 19]. В данном случае факторы солености, температуры воды и рН среды, как не влияющие на результаты анализа, не учитывались, а в качестве коэффициентов концентрации ионов взяты относительные изменения по отношению к среднему значению [19]. Для факторов скорости течения и типа биологического обрастания коэффициенты подобраны методом наименьших квадратов по аналогии с работой [20].

Таблица 3

Расчетные значения коэффициентов

Показатель	Значения показателей при экспозиции						
	в натуральных условиях (номер мониторинговой точки)					в лабораторных условиях	
	5	2	3	1	6		
Соленость, ‰	18,4	18,2	18,3	18,2	18,7	19,5	
Температура воды, °С	24,3	24	24,3	24,1	24,6	21,1	
рН, усл. ед.	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	
Концентрация ионов, мг/л	(NH ₄) ⁺	Не обнаружено					
	K ⁺	1,076	1,044	1,220	0,997	0,846	1,328
	Na ⁺	0,992	0,982	0,957	0,988	0,990	1,096
	Mg ²⁺	0,988	0,984	0,963	0,944	1,005	1,111
	Ca ²⁺	1,306	0,860	0,838	0,791	0,933	0,900
	Cl ⁻	0,982	0,980	0,978	0,943	1,005	1,117
	SO ₄ ²⁻	1,011	1,022	0,977	0,949	1,031	0,968
Растворенный кислород, мг/л	1,026	1,089	0,959	0,984	1,023	0,862	
Скорость течения, см/с	0,1	0,5	0,5	1	1	0,1	
Биота (фауна 1, флора + фауна 0,7)	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,7	
Произведение коэффициентов K	0,098	0,331	0,431	0,453	0,582	0,095	
Скорость коррозии, г/(м ² ·ч)	0,094	0,142	0,209	0,242	0,339	0,015	

Подставляя значение произведения коэффициентов K в уравнение (2) при единичном времени t , получим скорость коррозии.

На рис. 3 представлена зависимость скорости коррозии от значения произведения коэффициентов K . Видно, что скорость коррозии линейно зависит от произведения коэффициентов K , при этом:

- точка 4 исключена из расчетов из-за наличия углеводородов в коррозионной среде;
- наибольшее влияние на скорость коррозии оказывают следующие факторы – растворенный кислород, скорость движения морской воды и наличие беспозвоночных животных (усоногих раков и мшанок) [21, 22].

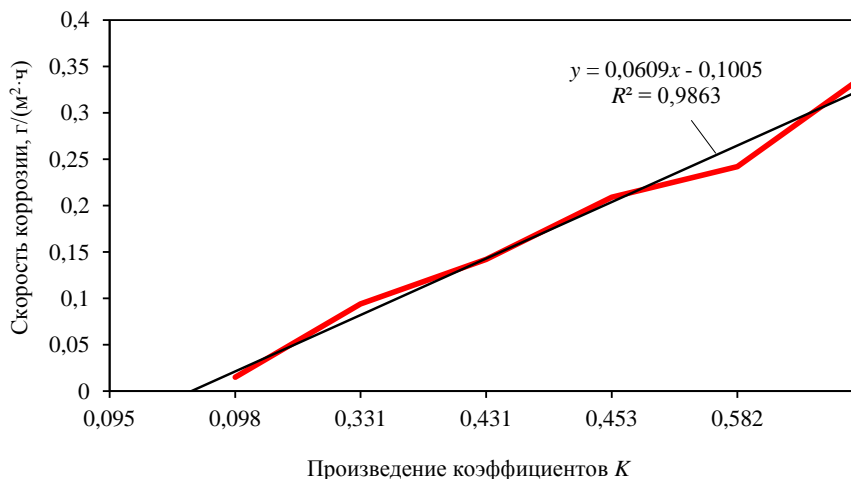


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии от произведения приведенных значений факторов (см. табл. 3)

Таблица 4

Потери механических свойств образцов из сплава АМгб после 3 мес экспозиции в мониторинговых точках и в лабораторных условиях

Номер мониторинговой точки	Потери механических свойств, %		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ
1	3,23	8,09	18,93
2	3,73	9,83	18,55
3	2,23	7,80	9,49
4	2,98	9,83	15,25
5	2,98	8,67	17,33
6	7,71	7,32	45,83
Лабораторные условия	0,24	3,20	8,01

Несмотря на достаточно высокую коррозионную стойкость сплава, постепенное разрушение оксидной пленки за счет биообрастания приводит к увеличению потерь механических свойств сплава в 10–15 раз – для предела прочности (с 0,25 до 3–4%) и на 30% – для предела текучести при экспозиции в летний период (табл. 4). При этом установлено, что локализация условий экспозиции в акватории бухты не оказывает значительного влияния на величину потерь механических свойств.

Заключения

В результате проведенных исследований коррозионной стойкости образцов из алюминиевого сплава АМгб в течение 3 мес в летний период в шести мониторинговых точках Геленджикской бухты установлено, что:

- минимальная степень обрастания образцов соответствует максимальной концентрации ионов морской воды;
- бóльшая степень обрастания пластин из сплава АМгб соответствует меньшим коррозионным потерям (наиболее четко прослеживается по глубине питтинговой коррозии);
- наибольшее влияние на скорость коррозии образцов оказывает скорость течения морской воды и тип биологического обрастания. Обрастание моллюсками и беспозвоночными приводит к более интенсивной коррозии, чем обрастание водорослями;
- наличие одиночных питтингов в пределах 48–152 мкм для образцов после натуральных испытаний и 21 мкм для образцов, экспонируемых в лабораторных условиях;
- наличие биообрастания приводит к увеличению потерь механических свойств сплава в 10–15 раз для предела прочности (с 0,25 до 3–4%) и на 30% – для предела текучести;
- загрязнение акватории нефтепродуктами приводит к непредсказуемой скорости коррозии алюминиевых сплавов.

Дальнейшие исследования будут посвящены результатам оценки стойкости к коррозии и биообрастанию образцов после экспозиции в осенний, зимний и весенний периоды, а также при испытаниях в течение 12 мес.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10-18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
4. Варченко Е.А., Курс М.Г. Натурные испытания металлических материалов в морской воде: ключевые подходы к оценке стойкости к коррозии и биоповреждению // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2017. №11 (59). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-12-12.
5. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов. Л.: Химия, 1989. С. 162–163.
6. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. Л.: Металлургия, 1976. С. 400–401.
7. ALMET marine: офиц. сайт. URL: <http://www.almet-marine.com> (дата обращения: 20.12.2019).
8. Варченко Е.А., Курс М.Г. Влияние параметров коррозионной среды на свойства конструкционных металлических материалов при проведении испытаний в морской воде (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №5 (77). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-85-93.
9. Сорокин А.И. Исследование процесса разрушения алюминиевого сплава от контактной коррозии в высокоскоростном потоке морской воды // *Вісник СевНТУ. Сер.: Механіка, енергетика, екологія*. 2012. Вып. 132. С. 135–141.
10. Овчинников И.М., Титов В.Б., Кривошея В.Г. Новые данные о временной изменчивости течений по результатам многолетних измерений со стабилизированного буя на шельфе Черного моря // *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 286. №5. С. 1250–1254.

11. Бухарев Г.М., Лаптев А.Б., Яковенко Т.В., Бобырева Т.В. Роль оценки биологического фактора в обеспечении безопасной эксплуатации сложных технических систем в течение жизненного цикла // Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем: сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2017. С. 21–30. 1 электрон. опт диск.
12. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. №2. С. 4–9.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
14. Huppatz W., Meissner H. Effect of the temperature and salt content of sea water on the corrosion behavior of aluminium // Werkstoffe und Corrosion. 1987. Vol. 38. P. 709–710.
15. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.
16. Алюминиевый сплав системы Al–Mg–Si: пат. 2672977 Рос. Федерация; заявл. 01.11.17; опубл. 21.11.18.
17. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
18. Ахияров Р.Ж., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А., Белова Н.А. Исследование аномально низкой коррозионной стойкости трубной стали теплообменной аппаратуры для нефтепереработки // Нефтяное хозяйство. 2016. №1. С. 118–121.
19. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
20. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Скирта А.А., Лаптев Д.А. Метод оценки состояния материалов в процессе климатического старения // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №11. С. 20–29.
21. Турова Т.П., Соколова Д.Ш., Назина Т.Н., Груздев Д.С., Лаптев А.Б. Филогенетическое разнообразие микробных сообществ с поверхности полиэтилентерефталатных материалов при экспозиции в водных средах // Микробиология. 2020. Т. 89. №1. С. 99–110. DOI: 10.31857/S0026365620010152.
22. Tourova T., Sokolova D., Nazina T., Grouzdev D., Kurshev E., Laptev A. Biodiversity of Microorganisms Colonizing the Surface of Polystyrene Samples Exposed to Different Aqueous Environments // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 9. P. 3624–3642.