

УДК 620.193

*М.Г. Курс¹, А.Е. Кутырев¹, П.Ф. Киричок¹, М.А. Фомина¹***УСКОРЕННЫЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75

Приведены результаты исследования динамики развития процессов коррозионного разрушения алюминиевого сплава и углеродистой стали при проведении ускоренных испытаний в камере солевого тумана и циклических коррозионных испытаний в сравнении с данными, полученными при натурной экспозиции образцов в условиях умеренного теплого климата. Проведено сопоставление полученных результатов по показателям потерь массы, глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии, изменения толщины образца, а также ширины распространения коррозии от надреза для образцов стали с лакокрасочным покрытием.

Ключевые слова: *коррозия, алюминиевые сплавы, натурные коррозионные испытания, ускоренные испытания, циклические испытания.*

*M.G. Kurs¹, A.E. Kutuyrev¹, P.F. Kirichok¹, M.A. Fomina¹***ACCELERATED AND CYCLIC CORROSION TESTS
OF AVIATION MATERIALS**

The paper presents the results of a study of the dynamics of the development of corrosion damage to aluminum alloy and carbon steel during accelerated tests in a salt fog chamber and cyclic corrosion tests in comparison with data obtained during full-scale exposure of samples in a moderately warm climate. Comparison of the results obtained in terms of mass loss, depth of intergranular and pitting corrosion, changes in the sample thickness, as well as the width of propagation of corrosion from the notch for steel samples with a paint and varnish coating was carried out.

Keywords: *corrosion, aluminum alloys, full-scale corrosion testing, accelerated testing, cyclic testing.*

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

К наиболее широко применяемым методам оценки коррозионной стойкости металлических материалов относится проведение ускоренных испытаний в климатических камерах, которые позволяют за короткий срок получить сравнительную оценку коррозионной стойкости материалов и защитной способности покрытий. Тем не менее данный вид испытаний не позволяет с высокой степенью вероятности получить достоверную прогнозную оценку поведения материала в реальных атмосферных условиях. Перспективной является разработка режимов ускоренных коррозионных испытаний, обладающих высокой степенью корреляции с результатами экспозиции в натуральных условиях, что соответствует одному из основных Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки [1–4].

Лабораторные (ускоренные) коррозионные испытания в климатических камерах используют для быстрого получения сравнительных результатов по коррозионной стойкости различных материалов и защитных покрытий [5–7]. К стандартно применяемым

лабораторным методам коррозионных испытаний металлических материалов относятся испытания в камере солевого тумана (КСТ) по ГОСТ 9.913–90 [8]. Согласно данному ГОСТ, испытания при воздействии нейтрального солевого тумана имитируют воздействие тропического климата, включая морской туман. Режим испытаний включает распыление 5%-ного раствора NaCl при температуре $35 \pm 2^\circ\text{C}$, относительной влажности 95–98% в течение 3 мин через каждые 20 мин испытаний. Зарубежными аналогами нормативной документации на методы испытаний при постоянной или циклической выдержке в камере солевого тумана являются ISO 9227, ISO 14993, ISO 16539 [9–11].

Стандарт ГОСТ 9.308–85 [12] устанавливает требования к проведению ускоренных коррозионных испытаний металлических и неметаллических неорганических покрытий при воздействии нейтрального солевого тумана, кислого солевого тумана, кислого солевого тумана и хлорной меди, а также методом «корродкот» (испытания при повышенной температуре и влажности образцов с нанесенной коррозионно-агрессивной пастой) и другими видами испытаний. Метод оценки коррозионных поражений для таких покрытий установлен ГОСТ 9.311–87 [13] и включает градацию видов и площади коррозионных поражений покрытий, оценку защитных и декоративных свойств. Стандартом установлены коэффициенты значимости видов коррозионных поражений при оценке декоративных свойств покрытий.

В большинстве стандартов, устанавливающих требования к проведению ускоренных испытаний, оговаривается, что данные методы не предназначены для назначения сроков службы материала или покрытия и не позволяют прогнозировать их поведение в реальных климатических условиях. В частности, в работе [14] проведены испытания в камере солевого тумана сплава Д16 с определением коррозионных потерь. Авторами сделан вывод, что количественные результаты при ускоренных испытаниях слабо коррелируют с результатами натуральных испытаний, поскольку коррозионный процесс в камере на сплаве Д16 идет без замедления.

Многообразие методов проведения ускоренных испытаний и отсутствие корреляции данных методик с результатами натуральных испытаний не позволяют устанавливать квоты коррозионного разрушения металлических материалов, так как различные материалы могут показать удовлетворительную коррозионную стойкость при испытаниях по одной методике и совершенно неприемлемую – по другой. Таким образом, в настоящее время единственным способом получения достоверных сведений о поведении материала в условиях реальной эксплуатации (в частности, воздействия климатических факторов) является только натурная экспозиция в течение определенного срока испытаний, необходимого для реализации всех коррозионных процессов [15, 16].

При этом, в виду больших сроков натуральных испытаний, необходимость разработки методик ускоренных испытаний на стойкость к атмосферной коррозии привела к модификации методики испытаний в КСТ, а затем к появлению целого класса испытаний – циклических испытаний, в ходе которых на испытываемые образцы оказывают попеременное воздействие с использованием как КСТ, так и камеры влажности, а также целого ряда других воздействий – к например, ультрафиолетового излучения.

На территории РФ получил развитие метод ускоренных циклических испытаний лакокрасочных покрытий (ЛКП), отображенный в ГОСТ 9.401–91 [17], в который входят методы испытаний на стойкость к воздействию низких температур, солевого тумана, солнечного излучения, а также различного сочетания этих факторов. В данном ГОСТ приведены конкретные режимы испытаний ЛКП в зависимости от условий эксплуатации по ГОСТ 9.104–79 [18], при этом критериями оценки свойств приняты адгезионная прочность, ширина распространения коррозии от надреза и декоративные свойства по ГОСТ 9.407–84 [19].

Особое распространение циклические испытания получили в автомобилестроительной промышленности. Целый ряд автостроительных концернов, таких как Renault, Volvo, Volkswagen и многие другие, разработали свои методики циклических испытаний (табл. 1). Анализ целого ряда методик циклических испытаний и их сопоставление с данными натуральных испытаний приведены в работах [20–23]. В работе [20] авторами сделан вывод о том, что испытания при непрерывном распылении нейтрального 5%-ного раствора NaCl не должны использоваться для прогнозирования коррозионной стойкости стальных материалов. Кроме того, в этой работе целый набор методик циклических испытаний разделен на две группы в зависимости от солевой нагрузки хлорид-ионов. Показано, что следующие методики испытаний: Salt spray ISO 9227, VDA621-415, Volkswagen PV1210, в которых используются высокие концентрации NaCl (5%), приводят к обратному ранжированию материалов, по сравнению с результатами испытаний по методикам Renault ECC1 D172028; Volvo VICT VCS1027,149; General Motors GM9540P (method B) и Daimler Chrysler KWT-DC.

Данный вывод свидетельствует скорее не о недостатке методик циклических испытаний как таковых, а о сложности процессов атмосферной коррозии, где в зависимости от метеорологических и/или аэрохимических условий сравнительная коррозионная стойкость материалов может меняться. Например, в работе [24] изучена склонность сплава марки 6056 к питтинговой коррозии по сравнению со сплавом марки 2024. Авторами сделан вывод, что при высокой концентрации хлорид-ионов сплав 6056 более стоек к питтинговой коррозии, чем сплав 2024. Однако при низкой концентрации хлорид-ионов, наоборот, сплав 2024 обладает большей стойкостью по сравнению со сплавом 6056.

Таблица 1

Режимы ускоренных коррозионных испытаний по различным методикам [20]

Методика циклических испытаний	Режим испытаний			Температура, °С	Относительная влажность, %; продолжительность	Продолжительность испытания, дней
	концентрация солевого раствора; pH; скорость осаждения в 80 см ²	частота распыления солевого раствора, ч/неделя	количество осажденных хлоридов, мг/см ²			
Renault ECC1 D172028	1%-ный NaCl; pH=4; 5 мл/ч	3,5	8	35 35 35	20; 1ч 35 мин 55; 2 ч 40 мин 90; 1 ч 20 мин	42
Volvo VICT VCS1027,149	1%-ный NaCl; pH=4; 120 мл/ч	1,5	27	45 35	50; 4 ч 95; 4 ч	42
VDA621-415	5%-ный NaCl; pH=6,5–7,2; 1,5 мл/ч	24	136	40 18–28 23	100; 8 ч 50; 16 ч 50; 48 ч	70
Volkswagen PV1210	5%-ный NaCl; pH=6,5–7,2; 1,5 мл/ч	20	68	23 40	50; 4 ч 100; 16 ч	42
General Motors GM9540P (method B)	0,9%-ный NaCl; 0,1%-ный CaCl ₂ ; 0,255%-ный NaHCO ₃ pH=6–9	14	Не определено	50 60	100; 8 ч 30; 8 ч	40
Daimler Chrysler KWT-DC	1%-ный NaCl; pH=6,5–7,2; 2 мл/ч	8	7,3	От -15 до +50	50–100	42
Salt spray ISO 9227	5%-ный NaCl; pH=6,5–7,2; 1,5 мл/ч	Постоянно распыляется	383	35	Не контролировалась	28

Поскольку результаты циклических испытаний сильно зависят от типов материалов, которые подвергаются испытаниям, то для использования таких испытаний в авиационной отрасли, необходимо разработать свой комплекс методик циклических

испытаний, позволяющий в той или иной степени прогнозировать коррозионное поведение авиационных материалов. Особенно актуален данный вопрос для алюминиевых сплавов, которые являются основным авиационным материалом, и разработка методики их циклических испытаний, которая должна входить в состав комплексных коррозионных испытаний [25], является одной из важных задач.

В данной работе поставлена задача: провести апробацию существующих методик циклических испытаний для алюминиевого сплава марки 1163 как одного из наиболее широко применяемых авиационных материалов, а также для стали 30ХГСА, в том числе и с защитным покрытием. Использование стали 30ХГСА оправдано не только тем, что она широко применяется в авиационной промышленности, но и тем, что показатели коррозионной стойкости сталей в атмосферных условиях достаточно близки (за исключением нержавеющей). Поэтому можно сравнить результаты, полученные в данной работе, с результатами других исследователей, полученных на сталях, применяемых в автомобилестроении. В качестве методик использовали методики с высокой солевой нагрузкой по хлорид-ионам, а именно – VDA621-415 и Salt spray ISO 9227 [20], поскольку скорость коррозии алюминия определяется в основном хлорид-ионами.

Материалы и методы

Материалы для испытаний

В качестве исследуемых материалов применялись:

- образцы из листа сплава 1163-Т без покрытия и плакировки толщиной 1,5 мм размером 50×100 мм;
- образцы из стали 30ХГСА без покрытия толщиной 2 мм размером 50×100 мм;
- образцы из стали 30ХГСА с фосфатным оксидированием и лакокрасочным покрытием, размером 100×150 мм с двумя нанесенными вертикальными надрезами до металла.

Для образцов из сплава 1163-Т без покрытий проводили оценку потери массы, глубины и характера коррозионных поражений (межкристаллитная (МКК) и питтинговая коррозия) – по ГОСТ 9.908–85.

Для образцов из стали 30ХГСА без покрытия проводили оценку потери массы и изменения толщины образца – по ГОСТ 9.908–85.

Для образцов из сплава 1163-Т и стали 30ХГСА с защитным покрытием проводили оценку ширины распространения коррозии от надреза по ГОСТ 9.407–84, а также оценку изменения внешнего вида образцов.

Методы исследований

Испытания в натуральных условиях проводили при экспозиции образцов на атмосферном стенде под углом 45 градусов к горизонту, расположенном на открытой площадке, в течение 3, 6, 12, 18 и 24 мес в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) ВИАМ, который находится в умеренном теплом климате с мягкой зимой приморской атмосферы.

Испытания в камере солевого тумана (КСТ) проводили при непрерывной выдержке образцов в камере в течение 100, 200, 300, 600, 900, 1000, 1200, 1500, 1800 и 2000 ч при температуре 35°C и влажности 98% при постоянном распылении 5%-ного раствора NaCl.

Испытания по методике VDA 621-415 проводили в течение 3, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 и 20 циклов по следующему режиму:

- выдержка в камере солевого тумана при температуре 35±2°C и 5±0,5%-ной концентрации NaCl в течение 1 сут;

– выдержка в атмосфере влажного климата с конденсацией влаги в течение 4 сут, при этом в течение каждых суток:

- при температуре $40 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\sim 100\%$ в течение 8 ч;
- при температуре $18\text{--}28^\circ\text{C}$ и относительной влажности 75% в течение 16 ч (отключение испытательного оборудования с естественным снижением влажности);
- выдержка при температуре $18\text{--}28^\circ\text{C}$ в условиях окружающей среды в течение 2 сут (оборудование отключено, рабочая зона камеры открыта).

Продолжительность одного цикла составляет 7 сут.

Результаты и обсуждение

Результаты натурной экспозиции

Результаты оценки изменения свойств материалов после двух лет натурной экспозиции представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

**Результаты натуральных испытаний после двух лет экспозиции
в условиях умеренного теплого климата**

Срок экспозиции, мес	Материал	Потери массы, $\text{г}/\text{м}^2$	Глубина МКК	Глубина питтинговой коррозии	Изменение толщины образца	Ширина распространения коррозии от надреза
3	1163-Т	0,639	0,196	0,080	–	–
	30ХГСА	100,197	–	–	0,0133	2,0570
6	1163-Т	1,17	0,220	0,082	–	–
	30ХГСА	169,58	–	–	0,0215	2,5113
12	1163-Т	2,847	0,225	0,130	–	–
	30ХГСА	253,9	–	–	0,0325	4,3334
18	1163-Т	3,27	0,240	0,162	–	–
	30ХГСА	321,01	–	–	0,0410	6,127
24	1163-Т	5,402	0,245	0,182	–	–
	30ХГСА	397,34	–	–	0,0520	9,294

Как видно из рис. 1, данные по потерям массы образцов из стали 30ХГСА аппроксимируются линейной зависимостью с высокой степенью достоверности – $R^2=0,989$; для сплава 1163-Т – линейной зависимостью $R^2=0,907$.

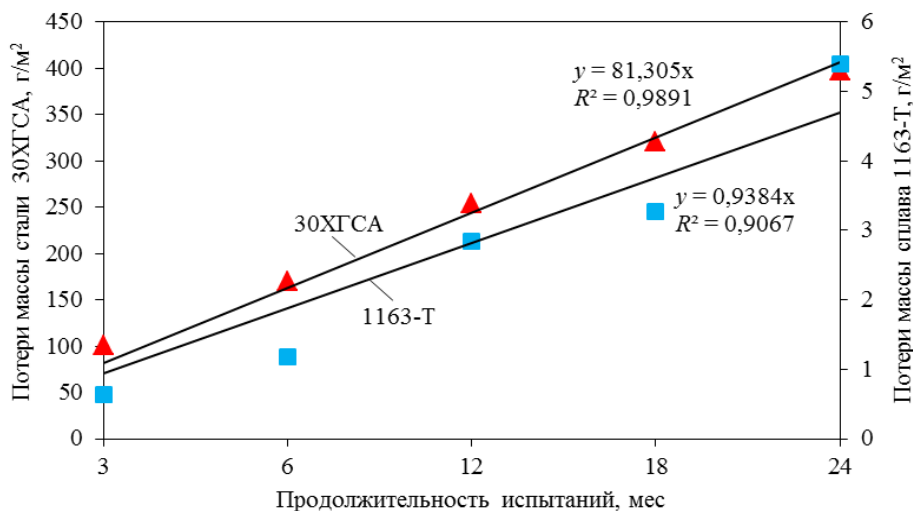


Рис. 1. Удельные потери массы образцов из сплава 1163-Т и стали 30ХГСА без покрытия после двух лет натуральных испытаний

При анализе глубины и характера коррозионных поражений сплава 1163-Т отмечается преобладающая склонность сплава к межкристаллитной коррозии, рост которой после 18 мес испытаний прекращается.

Результаты ускоренных испытаний

Результаты оценки потерь массы образцов из сплава 1163-Т и стали 30ХГСА после испытаний в КСТ представлены на рис. 2, а. Полученные результаты хорошо аппроксимируются линейной зависимостью – $R^2 > 0,96$ для обоих материалов. При сравнении результатов определения массопотерь образцов с данными после двух лет натурной экспозиции следует отметить, что наиболее близкие значения данного показателя для сплава 1163-Т получены после 200 ч испытаний в КСТ, для стали 30ХГСА – после 600 ч испытаний.

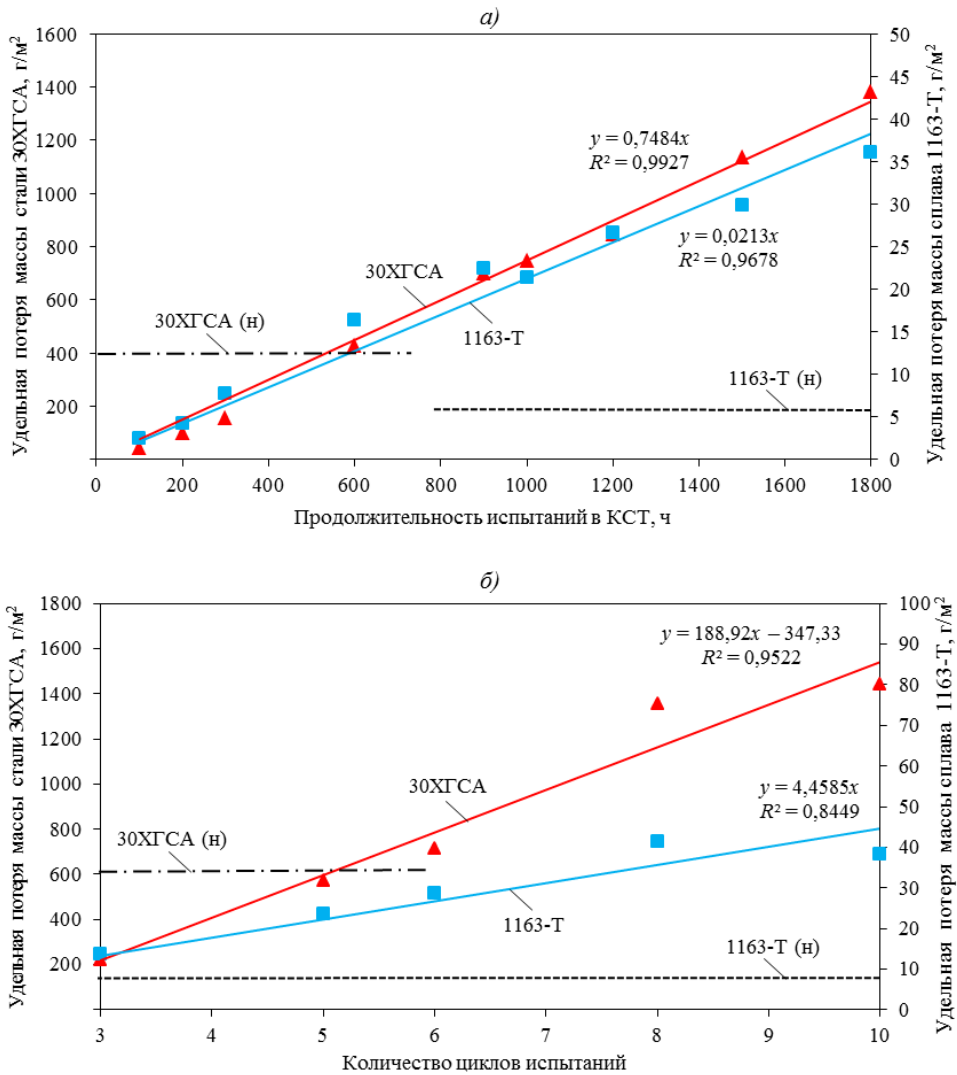


Рис. 2. Удельные потери массы образцов из сплава 1163-Т и стали 30ХГСА без покрытия после ускоренных испытаний в КСТ (а) и циклических испытаний (б) в сравнении с результатами после двух лет натурной экспозиции

Результаты оценки потерь массы образцов из сплава 1163-Т и стали 30ХГСА после испытаний по методике VDA 621-415 приведены на рис. 2, б. В данном случае достоверность аппроксимации линейной зависимостью ниже по сравнению с ускоренными

испытаниями в КСТ: $R^2=0,84$ – для сплава 1163-Т и $R^2=0,95$ – для стали 30ХГСА. В сравнении с результатами натурной экспозиции в течение двух лет соответствующие значения массопотерь для обоих материалов получены уже после трех циклов испытаний.

При достижении срока испытаний 1800 ч характер коррозии становится сквозным, в связи с чем испытания останавливали. Следует отметить, что в ГОСТ 9.913–90 [8] для алюминия и его сплавов установлены сроки проведения испытаний на воздействие нейтрального солевого тумана, имитирующего воздействие тропического климата, включая морской туман, – в 90–360 сут. Выдержка в течение 1800 ч, при которой характер коррозионного поражения переходит в сквозной, соответствует 75 сут испытаний. Таким образом, при испытании листовых полуфабрикатов сроки испытания в КСТ необходимо корректировать в зависимости от толщины образцов.

Однако решение вопроса о применимости ускоренных испытаний для прогнозирования коррозионного поведения алюминиевых сплавов на основании сравнения кинетических зависимостей массовых потерь при натуральных и ускоренных испытаниях, как это было сделано в работе [14], ошибочно. Зависимость коррозии алюминиевых сплавов от продолжительности испытаний достаточно сложна и неочевидна. Для металлических материалов, подверженных общей коррозии, таких как железо, медь, цинк, данный вопрос хорошо изучен и описан [25, 26]. Обычно применяют степенную зависимость $K=A \cdot t^n$, где K – интегральный коррозионный показатель (обычно удельная величина массопотерь); t – продолжительность испытания; A и n – константы. При этом показатель степени $n < 1$ вследствие образования защитных продуктов коррозии. Для алюминиевых сплавов также возможно использование данного уравнения, однако погрешность при его применении достаточно высока.

В работе [27] предложена более сложная кинетическая зависимость атмосферной коррозии алюминиевых сплавов. Однако вследствие больших статистических погрешностей установить конкретный закон для атмосферной коррозии алюминиевых сплавов и определить константы в уравнении закона – задача очень трудоемкая.

Решение вопроса о применимости циклических испытаний для алюминиевых сплавов должно заключаться не в процессе сравнения аппроксимированных уравнений зависимостей, которые могут в той или иной степени быть приведены математически, а в рассмотрении характера коррозионного процесса алюминиевого сплава, который, как известно, в атмосферных условиях может быть представлен тремя видами коррозии – питтинговой (ПК), межкристаллитной (МКК) и расслаивающей (РСК). Каждый из этих видов коррозии имеет не только свои кинетические закономерности [28, 29], но и разное влияние на прочностные характеристики. Вследствие этого основной критерий, по которому необходимо устанавливать применимость ускоренных испытаний в рамках прогнозирования поведения алюминиевых сплавов, – это соотношения между ПК, МКК и РСК.

На рис. 3 приведены результаты оценки глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии образцов из сплава 1163-Т после 1800 ч испытаний в КСТ в сопоставлении с результатами оценки глубины МКК и питтинговой коррозии после натуральных испытаний (соответственно МКК (н) и питтинг (н)).

Согласно представленным на рис. 3 данным, при испытаниях в КСТ сплав в наибольшей степени подвержен развитию питтинговой коррозии, которая превышает глубину МКК в 1,5–2 раза. При достижении срока испытаний 1800 ч характер коррозии становится сквозным. При натурной же экспозиции для сплава характерно развитие в большей степени МКК, чем питтинговой коррозии.

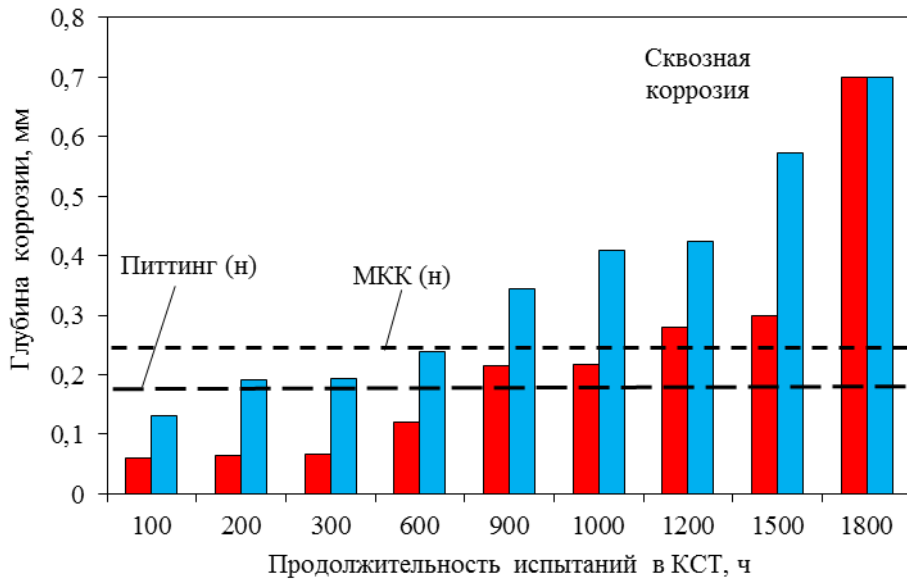


Рис. 3. Глубина межкристаллитной (■) и питтинговой (■) коррозии образцов из сплава 1163-Т после ускоренных испытаний в КСТ в сравнении с результатами после двух лет натурной экспозиции (--- и ---- соответственно)

Известно [15, 21], что для алюминиевых сплавов характерно торможение роста глубины локальной коррозии с увеличением срока испытаний. Однако при испытаниях в КСТ скорость роста глубины питтинговой коррозии не снижается, а растет вплоть до сквозной коррозии. В наибольшей степени результатам натурной экспозиции соответствует глубина питтинга, полученная после 200–300 ч испытаний в КСТ, а глубина МКК – после 1200 ч испытаний в КСТ.

На рис. 4 приведены результаты оценки изменения толщины образца и ширины распространения коррозии от надреза образцов стали 30ХГСА после 1800 ч испытаний в КСТ. Как видно из данных рис. 4, наиболее резкий рост ширины распространения коррозии происходит в диапазоне продолжительности испытаний 300–900 ч – от 0 до 1,11 мм. В период времени 900–1800 ч увеличение показателя составляет 63%.

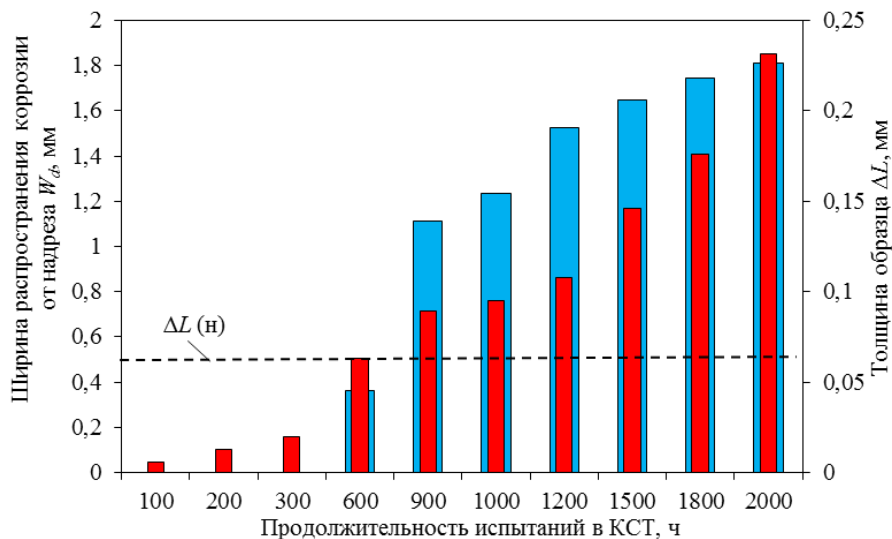


Рис. 4. Изменение толщины образца (■) и ширины распространения коррозии от надреза (■) образцов из стали 30ХГСА после ускоренных испытаний в КСТ в сравнении с результатами после двух лет натурной экспозиции

Полученные значения изменения толщины образца после двух лет натуральных испытаний соответствуют 600 ч испытаний в КСТ. Результаты по ширине распространения коррозии от надреза, полученные при натуральных испытаниях, значительно превышают данные ускоренных испытаний.

На рис. 5 приведены результаты оценки глубины коррозии при проведении циклических испытаний. В ходе первых четырех замеров, так же как и при испытаниях в КСТ, преобладает питтинговый характер разрушения. По глубине МКК результатам натурной экспозиции в течение двух лет в наибольшей степени соответствуют данные после 5–6 циклов испытаний. При питтинговой коррозии уже после трех циклов испытаний полученные значения превышают данные натурной экспозиции в течение двух лет, что связано с постоянным наличием пленки электролита в устье коррозионного очага.

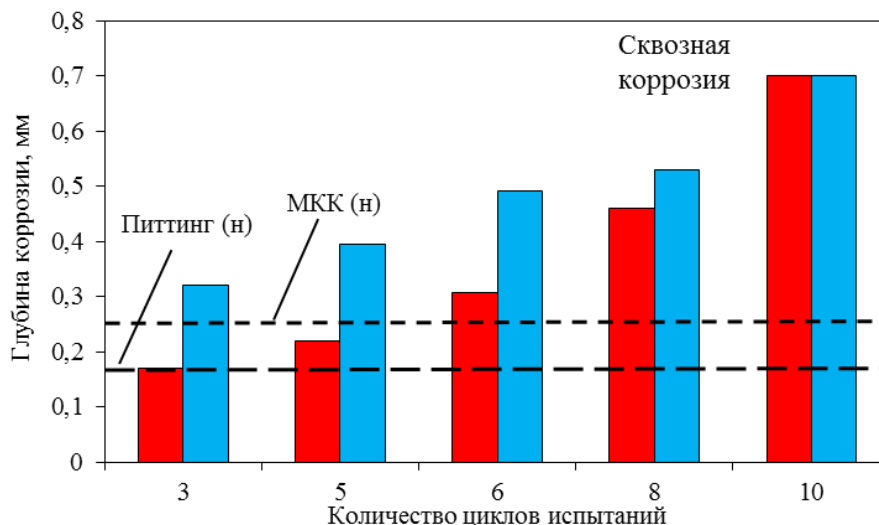


Рис. 5. Глубина межкристаллитной (■) и питтинговой (■) коррозии образцов из сплава 1163-Т после ускоренных циклических испытаний в сравнении с результатами после двух лет натурной экспозиции (- - - и - - - соответственно)

При экспозиции в ГЦКИ в натуральных условиях среднегодовые значения величины продолжительности увлажнения поверхности составляют 5289 ч/год при температуре $t \geq -1^\circ\text{C}$ и влажности $\phi \geq 70\%$ и 3312 ч/год при $t > 0^\circ\text{C}$ и $\phi > 80\%$, что составляет соответственно 60 и 38% времени от общей продолжительности испытаний, при этом смена цикла «увлажнение–высыхание» в течение 1 сут может происходить до 6 раз в зависимости от времени года и режима осадков. Частая смена данных периодов определяет процесс образования продуктов коррозии в очаге коррозионного разрушения, препятствующего дальнейшему взаимодействию поверхности с окружающей средой. При испытаниях же в КСТ высыхания поверхности не происходит в течение всего периода испытаний, а при циклических испытаниях, согласно приведенному ранее режиму (методика VDA 621-415), высыхание поверхности происходит всего 1 раз в неделю (при выдержке образцов в комнатных условиях), в остальное время в течение цикла материал подвергается непрерывному воздействию пленки влаги.

На рис. 6 приведены результаты оценки изменения толщины образца и ширины распространения коррозии от надреза образцов из стали 30ХГСА: аналогично глубине МКК (по приведенным показателям изменения толщины образца) значения, полученные после двух лет натуральных испытаний, в большей степени соответствуют результатам после 5 циклов. Значения ширины распространения коррозии от надреза после натуральных испытаний значительно превышают данные, полученные после циклических испытаний.

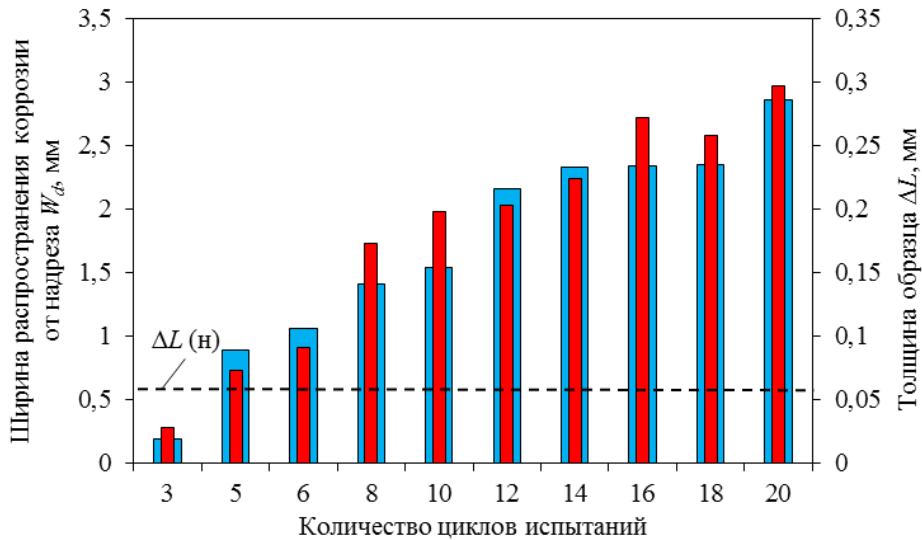


Рис. 6. Изменение толщины образца (■) и ширины распространения коррозии от надреза (■) образцов из стали 30ХГСА после ускоренных циклических испытаний в сравнении с результатами после двух лет натурной экспозиции

В табл. 3 приведены итоговые данные по сравнению результатов натуральных и ускоренных испытаний для образцов из алюминиевого сплава 1163 и стали 30ХГСА (в том числе с покрытием). Для сравнения использовали следующие величины: продолжительность ускоренных испытаний $t_{\text{уск}}$, при которой совпадает какой-либо из параметров коррозионного разрушения за определенный период натуральных испытаний (один или два года), и коэффициент ускорения испытаний, рассчитанный также при условии равенства какого-либо параметра коррозионного разрушения при определенной продолжительности натуральных испытаний $t_{\text{нат}}$ согласно уравнению $K_{\text{уск}} = t_{\text{нат}} / t_{\text{уск}}$.

Таблица 3

Соответствие параметров коррозионного разрушения при ускоренных и натуральных испытаниях

Вид ускоренных испытаний	Материал	Сопоставляемые параметры	Соответствие параметров при продолжительности натурной экспозиции, год			
			1		2	
			$t_{\text{уск}}$, ч (циклы)	$K_{\text{уск}}$ *	$t_{\text{уск}}$, ч (циклы)	$K_{\text{уск}}$ *
КСТ	1163	Потеря массы	100	88	200	88
		Глубина МКК	1000	9	1000	9
		Глубина питтинга	100	88	200	88
	30ХГСА	Потеря массы	300	29	600	29
		Ширина распространения коррозии от надреза	>2000	<4	>2000	<9
		Изменение толщины образца	300	29	600	29
VDA**	1163	Потеря массы	<3	87	<3	87
		Глубина МКК	5	12	5	10
		Глубина питтинга	<3	91	<3	98
	30ХГСА	Потеря массы	3	17	5	21
		Ширина распространения коррозии от надреза	>20	<3	>20	<5
		Изменение толщины образца	3	17	5	21

* Для расчета $K_{\text{уск}}$ использовали продолжительность испытаний исходя из того, что длительность одного цикла равна 7 сут.

** Для испытаний по методике VDA в качестве продолжительности ускоренных испытаний представлено количество циклов.

Как видно из данных табл. 3, для алюминиевого сплава 1163 при испытаниях в КСТ наблюдаются достаточно высокие коэффициенты ускорения $K_{\text{уск}}$ по параметрам изменения массы и глубины питтингов, равные 88. Однако для параметра глубины МКК значения коэффициентов ускорения снижаются на порядок – до девяти. Подобный результат получен для алюминиевого сплава 1163 при циклических испытаниях по методике VDA: $K_{\text{уск}}$ по параметрам изменения массы равен 87, по глубине питтингов: 91–98. Замечено, что при испытаниях по методике VDA коррозионные характеристики определяли только после третьего цикла, когда степень коррозии алюминиевого сплава превысила аналогичную величину после двухлетних испытаний в натуральных условиях (за исключением МКК), вследствие этого коэффициент ускорения определяли по данным, полученным путем экстраполяции полученной зависимости, что дало дополнительную погрешность при определении величины $K_{\text{уск}}$. Однако для сравнения с величиной $K_{\text{уск}}$, полученной для параметра глубины МКК, такой точности вполне достаточно, поскольку и для испытаний по методике VDA различие в значениях $K_{\text{уск}}$ по питтинговому и межкристаллитному типам коррозии составляет целый порядок.

Такое различие не позволяет применять указанные виды ускоренных испытаний для прогнозирования коррозионного поведения алюминиевых сплавов, подверженных МКК. Однако равенство величин $K_{\text{уск}}$, полученных для параметров изменения массы и глубины питтингов, показывает равенство величин фактора питтинговой коррозии $k_{\text{п.к}}$ [29] при ускоренных и натуральных испытаниях, что указывает на некоторую общность механизмов развития питтинговой коррозии. Например, для разработки методики нанесения коррозионных поражений с помощью анодного растворения, обеспечение одинаковых значений $k_{\text{п.к}}$ представляет достаточно сложную задачу [30]. С учетом данного факта, для сплавов, стойких к МКК (например, сплавы 1933-T3 [31] и B95п.ч.-T2 [32]) и обладающих высоким сопротивлением к МКК и РСК, возможно применение как ускоренных испытаний по методике VDA, так и менее трудоемких испытаний в КСТ.

Для большинства алюминиевых сплавов, в которых развитие МКК все же происходит, необходимо разработать новую методику ускоренных испытаний, которая обеспечила бы большее соответствие натурным испытаниям. В связи с этим необходимо определить различие в механизме коррозии при ускоренных и натуральных испытаниях. В качестве причины несоответствия испытаний в КСТ и натуральных испытаний исследователи обычно называют непрерывность воздействия, без изменения условий воздействия, которое происходит в естественных условиях [33], – в частности, различные защитные свойства вторичных продуктов коррозии [34]. Однако, видимо, влиянием вторичных продуктов коррозии, значительным образом проявляющих себя при атмосферной коррозии металлических материалов, корродирующих по типу общей коррозии, на алюминиевых сплавах можем пренебречь, поскольку торможение коррозии для них не так выражено, как для углеродистых сталей, цинка или меди. Вследствие этого факт постоянного нахождения поверхности алюминиевых сплавов в условиях высокой влажности, в отличие от натуральных условий, где обеспечивается процесс высыхания поверхности образцов, в том числе и продуктов коррозии, не столь существенен, а подход, аналогичный тому, который был предложен еще при разработке циклических испытаний [35], и впоследствии внесенный в стандарт ASTM G85, не даст ожидаемого эффекта. Заметим, что при циклических испытаниях по методике VDA в сравнении с испытаниями в КСТ непрерывность воздействия отсутствует, а соотношение между величинами $K_{\text{уск}}$ по питтинговому и межкристаллитному типам коррозии остается таким же.

Наиболее вероятно, что различие коррозионных процессов при ускоренных и натуральных испытаниях на алюминиевых сплавах обусловлено большей толщиной пленки влаги, адсорбирующейся на поверхности образцов при ускоренных испытаниях.

В этом случае при разработке новой методики ускоренных циклических испытаний основными будут являться следующие положения: уменьшение продолжительности выдержки в КСТ, величина относительной влажности в которой достигает 98%; проведение испытаний в камере тепла и влаги при небольших значениях влажности (при 80%) на границе образования фазовых пленок влаги [36]; периодизация процесса испытаний, подразумевающая высыхание пленок влаги и их повторное образование. С учетом результатов работы [25], где показана различная сравнительная коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в зависимости от коррозионной агрессивности среды, при разработке новой методики для испытаний алюминиевых сплавов необходимо учитывать метеорологические и аэрохимические параметры атмосферы той местности, где преимущественно будет использоваться испытываемый материал.

Применение методик ускоренных испытаний для сталей показывает значительное различие в значениях коэффициентов ускорения для образцов с покрытием и без покрытия. Это позволяет сделать вывод, что данные методики для испытаний образцов из углеродистой стали с покрытиями не могут быть использованы. Видимо, дело в различии ускоряющих факторов, воздействующих на коррозию стали и на диффузию влаги вдоль лакокрасочного покрытия. Данное различие требует специального рассмотрения, но можно предположить, что необходимо проводить воздействие при повышенной температуре, возможно, в условиях относительно невысокой влажности. Приведенный в методике VDA период воздействия – выдержка в камере влажности при температуре $40\pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\sim 100\%$ – видимо, явно недостаточен.

Заключения

1. При испытаниях в КСТ для стали 30ХГСА уровень коррозионных потерь после 600 ч испытаний приблизительно соответствует двум годам натурной экспозиции в условиях умеренного теплого климата по показателям скорости коррозии, изменения толщины образца и ширине распространения коррозии от надреза. Для сплава 1163-Т динамика развития локальной коррозии отлична от механизма разрушения при натурной экспозиции, что не позволяет использовать данный метод для прогнозирования коррозионных потерь неравномерно корродирующих материалов: при испытаниях в КСТ сплав в большей степени подвержен питтингообразованию в связи с постоянным воздействием пленки электролита в устье коррозионного очага.

2. При циклических испытаниях по методике VDA 621-415 в сравнении с результатами двух лет натурной экспозиции коррозионные потери стали 30ХГСА по показателю потери массы соответствуют трем циклам испытаний, по показателям изменения толщины образца и ширине распространения коррозии от надреза – 5 циклам испытаний. Для сплава 1163-Т (так же как при испытаниях в КСТ) – ввиду превалирующего воздействия пленки влаги в течение периода испытаний – в наибольшей степени происходит рост питтинга, глубина которого уже после трех циклов испытаний в 2 раза превышает значения, полученные после двухлетней натурной экспозиции. Различие механизмов процессов коррозионного разрушения для алюминиевого сплава не позволяет рекомендовать данный метод испытаний для прогнозирования поведения материала в атмосферных условиях.

3. При проведении сравнительных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов при непрерывной выдержке в КСТ следует применять меньшие сроки выдержки в камере – не более 1500 ч вместо 90–360 сут, установленных в ГОСТ 9.913–90, ввиду достижения сквозных коррозионных поражений для листа толщиной 1,5 мм уже через 1800 ч испытаний.

4. Проведенные исследования по стандартно применяемым методикам позволили определить направления дальнейшего развития методов ускоренных испытаний, которые будут выполнены на следующих этапах при продолжении данной работы. Для получения данных по коррозионной стойкости металлических материалов, сравнимых с результатами натурной экспозиции при сохранении механизма коррозионного разрушения, необходима разработка режимов испытаний, в основе которых должны лежать следующие положения: уменьшение продолжительности выдержки в КСТ, проведение испытаний в камере тепла и влаги при небольших значениях влажности (при 80%), периодизация процесса испытаний, а также учет метеорологических и аэрохимических параметров атмосферы той местности, где преимущественно будет использоваться испытываемый материал.

ЛИТЕРАТУРА

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. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
4. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 157–167.
5. Чесноков Д.В., Антипов В.В., Кулюшина Н.В. Метод ускоренных лабораторных испытаний алюминиевых сплавов с целью прогнозирования их коррозионной стойкости в условиях морской атмосферы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №5 (41). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-10-10.
6. Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Моделирование воздействия испытательных факторов на коррозию металлических материалов при испытании на агрессивное воздействие компонентов промышленной атмосферы в камере солевого тумана // *Материаловедение*. 2015. №3. С. 7–15.
7. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №10. Ст. 6. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2019).
8. ГОСТ 9.913–90. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Алюминий, магниевый и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. 9 с.
9. ISO 9227:2012. Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests Standards Policy and Strategy Committee. Switzerland, 2012. 26 p.
10. ISO 14993:2001. Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, «dry» and «wet» conditions. Netherlands Standards, 2001. 20 p.
11. ISO 16539:2013. Corrosion of metals and alloys – Accelerated cyclic corrosion tests with exposure to synthetic ocean water salt-deposition process – «Dry» and «wet» conditions at constant absolute humidity British Standards Institution, 2013. 30 p.
12. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1985. 21 с.

13. ГОСТ 9.311–87. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений М.: Изд-во стандартов, 1987. 13 с.
14. Стрекалов П.В., Панченко Ю.М., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И., Никулина Т.В. Ускоренные испытания сплава Д16 в соляном тумане. Масса удержанных хлоридов, коррозия, механические свойства // Коррозия: материалы, защита. 2007. №10. С. 1–8.
15. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
16. Курс М.Г. Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В95о.ч.-Т2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №5 (65). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.
17. ГОСТ 9.401–91. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. М.: Изд-во стандартов, 1991. 29 с.
18. ГОСТ 9.104–79. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации. М.: Стандартиформ, 1979. 16 с.
19. ГОСТ 9.407–84. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. М.: Стандартиформ, 1984. 40 с.
20. LeBozec N., Blandin N., Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: A comparison of the performance towards cosmetic corrosion // *Materials and Corrosion*. 2008. Vol. 59. No. 11. P. 889–894.
21. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // Вопросы материаловедения. 2016. №1 (85). С. 116–126.
22. Курс М.Г. Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения листов из деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 22 с.
23. De Azevedo Alvarenga E., de Freitas Cunha Lins V. Atmospheric corrosion evaluation of electro-galvanized, hot-dip galvanized and galvanized interstitial free steels using accelerated field and cyclic tests. // *Surface & Coatings Technology*. 2016. No. 306. P. 428–438.
24. Blanc C., Mankowsky G. Susceptibility to pitting corrosion of 6056 aluminium alloy // *Corrosion science*. 1997. Vol. 39. No. 5. P. 949–959.
25. Игонин Т.Н. Атмосферная коррозия углеродистой стали и цинка (моделирование и картографирование территории Российской Федерации): автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2012. 26 с.
26. Panchenko Y.M., Marshakov A.I. Long-term prediction of metal corrosion losses in atmosphere using a power-linear function // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 109. P. 217–229.
27. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В. Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка концепции их комплексных коррозионных испытаний // III Междунар. науч.-технич. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате» (Геленджик, 07 сент. 2018 г.). М., 2018. С. 80–96. 1 электрон. опт. диск.
28. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Лешко С.С. Исследование кинетики межкристаллитной коррозии алюминиевого сплава Д16 при его анодном растворении // Фундаментальные исследования и последние достижения в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и сложных технических систем в различных климатических условиях: сб. докл. науч.-технич. конф. (Геленджик, 14–15 июл. 2016 г.). М., 2016. С. 17. 1 электрон. опт. диск.

29. Evaluation of pitting corrosion // ASM Metals Handbook. Vol. 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. 2003. P. 545–548.
30. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №9 (69). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
31. Tkachenko E.A., Fridlyander J.N., Valkov V.J., Baratov V.I. The properties and structure of high-strength aluminium 1933 alloy forgings // Materials Science Forum. 1996. Vol. 217–222. Part 3. P. 1819–1822.
32. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость и свойства алюминиевых сплавов авиационного назначения в условиях морского субтропического климата: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2006. 26 с.
33. Douglas M. Grossman. More realistic tests for atmospheric corrosion // ASTM Standartization news. 1996. No. 4. P. 32–39.
34. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgy, 1976. 472 с.
35. Simpson C.H., Ray C.J., Skerry B.S. Accelerated Corrosion Testing of Industrial Maintenance Paints Using a Cyclic Corrosion Weathering Method // Journal of Protective Coatings and Linings. 1991. Vol. 8. No. 5. P. 28–36.
36. Михайловский Ю.Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. М: Metallurgy, 1989. 102 с.