



Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации

(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Технологическая платформа «Новые полимерные композиционные
материалы и технологии»

Технологическая платформа «Материалы и технологии металлургии»

III Международная научно-техническая конференция «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате»

Материалы конференции

7 сентября 2018 г.

г. Геленджик

Электронное издание

Москва

2018

УДК 66.018.8

ББК 30.82

К68

Редакционная коллегия:

А.В. Славин, д.т.н., начальник Испытательного центра; Д.В. Чесноков, начальник лаборатории; Д.С. Лаврищев, заместитель начальника отдела; Е.А. Шеин, к.т.н., главный специалист; М.С. Закржевская, инженер 2-й категории.

«Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате» : материалы III Международной научно-технической конференции (г. Геленджик, 7 сентября 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2018. – 246 с. : ил. – ISBN 978-5-905217-32-6. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб. – Загл. с экрана.

Основные тематические направления конференции:
– коррозия и старение материалов в морских условиях Арктики, субтропического и тропического побережья регионов земного шара; – теория и практика исследований старения, коррозии, биологической стойкости материалов, элементов конструкций и сложных технических систем в природных средах; – методы, оборудование и приборы для испытаний на старение, коррозию, биологическую стойкость; – системы защиты материалов и техники от старения, коррозии, биологического воздействия в морских регионах; – ускоренные испытания материалов и элементов конструкций на старение, коррозию и биоповреждения; – коррозия, старение и биоповреждения объектов инфраструктуры в морском климате; – стандарты и нормативные документы для испытаний материалов и техники в природных средах.

УДК 66.018.8

ББК 30.82

ISBN 978-5-905217-32-6

© ФГУП «ВИАМ», 2018

Организационный комитет

(ФГУП «ВИАМ»)

Председатель:

Е.Н. Каблов – академик РАН, профессор, д.т.н., Генеральный директор ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ.

Заместители председателя:

А.В. Славин – д.т.н., начальник Испытательного центра.

Члены организационного комитета:

Д.Е. Каблов – к.т.н., заместитель начальника управления;

А.А. Каньгин – начальник управления;

В.Г. Дворяшин – заместитель начальника управления;

О.В. Старцев - д.т.н., заместитель начальника ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова;

Д.С. Лаврищев – заместитель начальника отдела;

Д.А. Браилко - начальник сектора;

А.В. Бабин – ведущий инженер;

Е.В. Лахтикова - начальник сектора;

И.Ю. Ширяева – главный специалист по маркетингу 1-й категории;

Е.А. Цилин – инженер 2-й категории.

СОДЕРЖАНИЕ

Особенности испытаний эластомерных материалов в зонах литорали и эпилиторали.....	7
Бобырева Т.В.; Бухарев Г.М.; Смирнов Д.Н.; Наумов И.С.	
Комплекс масс-спектрометрических методов исследования ингибиторов и продуктов коррозии на поверхности конструкционных материалов	16
Буряк А.К.	
Натурные испытания лакокрасочных покрытий на биологическое повреждение и обрастание в условиях умеренного холодного и теплого влажного климата Европейской части России.....	30
Бухарев Г.М.; Бобырева Т.В.; Новикова Т.А.	
Использование неорганического композиционного покрытия для ремонта противокоррозионной защиты стальных конструкций	44
Дёмин С.А.; Виноградов С.С.; Вдовин А.И.	
Антикоррозионная защита самолета-амфибии Бе-200	48
Дюдин В.Б.	
Коррозионные испытания модельных образцов и габаритных сварных конструкций из судостроительных корпусных сталей в натуральных морских условиях.....	56
Орыщенко А.С.; Калинин Г.Ю.; Фомина О.В., Мушникова С.Ю.	
Питтинговая коррозия деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях.....	63
Курс М.Г.; Лаптев А.Б.; Гончаров А.А.	
Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка концепции их комплексных коррозионных испытаний ..	80
Кутырев А.Е.; Чесноков Д.В.	
Влияние производных фенотиазина на электроосаждение цинка и его коррозию в присутствии сульфатредуцирующих бактерий.....	97
Грибанькова А.А.; Гурченко В.В.; Ларина В.В.; Шмелева Е.А.; Агиевич М.А.	

- Применение мессбауэровской спектроскопии к изучению коррозии в морском климате..... 108**
Филиппов В.П.; Лауэр Ю.А.; Калинин Б.А.; Петров В.И.
- Практика противокоррозионной защиты изделий авиационной техники разработки «ОКБ Сухого»..... 117**
Лукьянычев Д.А.; Филатов А.А.
- Комбинированные технологии получения износостойких и коррозионностойких покрытий на алюминии и его сплавах для изделий авиационной и морской техники, как альтернатива анодированию 124**
Марков М.А.; Кузнецов Ю.А.; Красиков А.В.; Быкова А.Д.; Макаров А.М.
- От оценки климатической стойкости материалов к климатическому исполнению изделий авиационной техники военного назначения 135**
Прокопенко А.Н.; Бакшаев С.И.
- Строительные материалы на основе отходов производства минеральной ваты с повышенной биологической и климатической стойкостью..... 152**
Ерофеев В.Т.; Родин А.И.; Якунин В.В.
- Методические особенности измерений механических показателей полимерных композиционных материалов при их старении..... 166**
Старцев О.В.; Славин А.В.
- Работоспособность эластомерных клеевых соединений конструкций летательных аппаратов в условиях ускоренного климатического старения..... 177**
Терехин А.В.; Русин М.Ю.; Антонов В.В.; Рауткин А.С.
- Допустимость коррозионных повреждений авиационных конструкций 187**
Тимофеев А.Н.
- Применение неразрушающего контроля при проведении натуральных климатических испытаний 201**
Титарева А.С.

**Разработки ИМКЭС СО РАН для метеорологического обеспечения
натурных испытаний материалов и изделий..... 208**

Тихомиров А.А.; Корольков В.А

**Применение программы FiberSIM в создании композитных
конструкций самолетов-амфибий..... 219**

Гежа С.А.; Штода А.Ю.

**Современные системы для испытаний авиационных материалов и
других объектов 227**

Анчевский И.Э.; Ильин В.В.; Вальтер Р.

**Исследование общей и коррозионной повреждаемости летательных
аппаратов Ан-12 с помощью простых статистических методов
анализа..... 234**

Барсук В.Е.; Калюта А.А.; Рудзей Г.Ф.; Ужакина О.М.; Фокин Е.А.;
Тимофеев А.Н.

УДК 620.1:663.18

Особенности испытаний эластомерных материалов в зонах литорали и эпилиторали

Бобырева Т.В.¹; Бухарев Г.М.¹; Смирнов Д.Н.¹; Наумов И.С.¹, к.т.н.

admin@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Аннотация:

Представлены результаты натурных испытаний герметиков после 6 месяцев экспозиции в трех зонах: литорали, эпилиторали и для сравнения в лесу по ГОСТ 9.053 на берегу Баренцева моря. Проведены физико-механические испытания материалов, экспонировавшихся во всех зонах, а также приведена оценка микологической контаминации поверхности герметиков.

Ключевые слова:

биоповреждения, натурные испытания, герметики, микромицеты.

Эластомерные материалы, такие как герметики и резины, широко применяются в различной технике, надежность которой во многом определяется стойкостью материалов из которых она сделана к воздействию факторов внешней среды. Одним из существенных факторов внешней среды являются микроорганизмы-деструкторы. Степень повреждения материалов микроорганизмами зависит как от

физиологических свойств микроорганизмов, так и от способов обработки сырых смесей и взаимодействия компонентов эластомерных материалов во время обработки, от химической природы полимеров и, следовательно, от возможности их использования микроорганизмами в качестве источников углерода, азота и других биогенных элементов [1, 2].

Факторы внешней среды, такие как влажность, температура, соленость, УФ излучение могут воздействовать как непосредственно на материал, так и косвенно – они влияют на формирование сообществ микроорганизмов, характерных для определенных биотопов. Соответственно для качественной оценки биологической стойкости эластомерных материалов необходимо учитывать абиогенные свойства различных биотопов [3].

Интерес представляют зоны литорали и эпилиторали, в качестве пограничных областей испытывающих воздействие факторов характерных как для водной, так и воздушной среды. Натурные испытания в условиях зон литорали и эпилиторали особенно значимы для амфибийной техники, например такой, как гидроавиация.

В российской нормативной базе в настоящее время существует ГОСТ 9.053-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы неметаллические и изделия с их применением. Метод испытаний на микробиологическую стойкость в природных условиях в атмосфере», предназначенный для оценки воздействия биогенных факторов на материалы при натурных испытаниях [4–8]. Сущность стандарта заключается в выдерживании образцов в условиях естественного заражения микроорганизмами при имитации хранения в неотопливаемых неизолированных помещениях, и определении микробиологической стойкости по степени развития микроорганизмов, при этом согласно этому стандарту допускается оценка изменений служебных свойств материалов [5, 6]. Испытания образцов проводят на микологических площадках,

размещенных на наземных климатических испытательных станциях. Данный стандарт достаточно жестко регламентирует почвенно-растительную характеристику микологических площадок, в том числе наличие трёхъярусной растительности, что затрудняет проведение испытаний в степных и обезлесенных регионах, а так же в условиях приливно-отливной зоны [9].

В данной работе проводилась оценка степени пораженности и исследование сохраняемости физико-механических свойств герметиков после воздействия микроорганизмов в натуральных условиях.

Для исследования были взяты образцы серийных полисульфидных (тиоколовых) герметиков ВИТЭФ-1НТ, ВИТЭФ-1Б, ВЭР-1 и У-30МЭС-5НТ. Натурная экспозиция продолжалась 6 месяцев в умеренном климате с морской атмосферой на побережье Баренцева моря. В ходе работы было установлено три стенда — в зоне литорали, эпилиторали и для сравнения в лесу по ГОСТ 9.053. Обрастание герметиков оценивались по ГОСТ 9.048-89 [10]. После экспонирования оценивались изменения следующих свойств материалов по сравнению с контрольными: изменение условной прочности образцов при разрыве, изменение относительного удлинения образцов при разрыве, изменение твердости образцов герметиков по Шору А, изменение прочности связи при отслаивании от алюминиевого сплава Д16АТ. Контрольные образцы хранились в комнатных условиях в течение 6 месяцев, после чего проводилось измерение их свойств.

Выделение микромицетов с поверхности материалов проводилось методом отпечатка на стерильные чашки Петри со средой Чапека.

В результате натурной экспозиции в течение 6 месяцев все материалы в атмосферном стенде и в эпилиторальном стенде имеют балл пораженности равным 0 баллов. В то время как все образцы, экспонировавшиеся в литоральном стенде имеют балл обрастания по ГОСТ 9.048-89 равным 4 (таблица 1).

Таблица 1

Оценка пораженности образцов герметиков, экспонирующихся в натуральных условиях, баллы

№ п/п	Герметик	Литоральный стенд	Эпилиторальный стенд	Стенд по ГОСТ 9.053
1	ВИТЭФ-1НТ	4	0	0
2	ВИТЭФ-1Б	4	0	0
3	ВЭР-1	4	0	0
4	У-30МЭС-5НТ	4	0	0

Все герметики, экспонировавшиеся на литоральном стенде, характеризуются интенсивным покрытием всей поверхности образца, как микроорганизмами, так и различными макрогидробионтами, рисунок 1. На образцах отчетливо видно даже невооруженным глазом развитие организмов, покрывающих не менее 25% испытываемой поверхности.

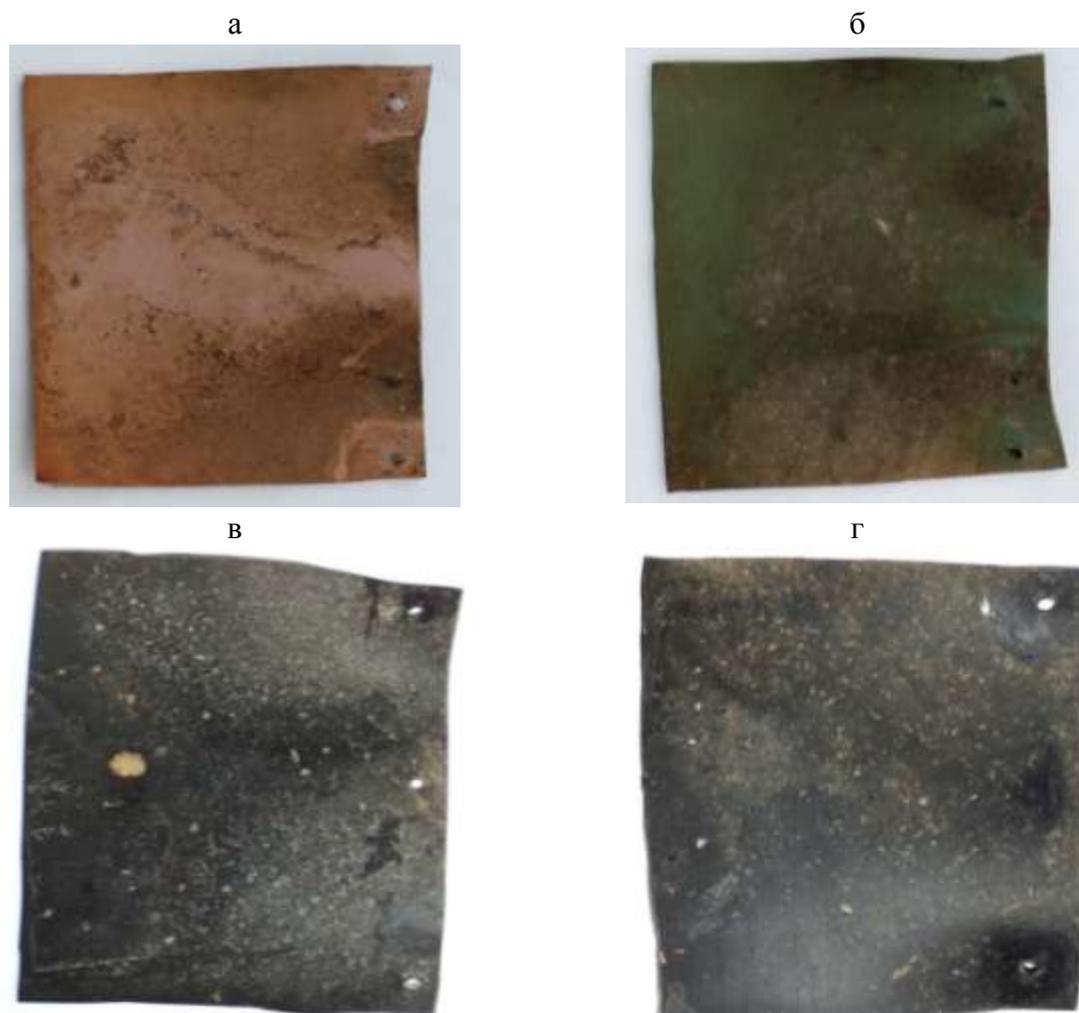


Рис. 1. Образцы герметиков после 6 месяцев экспонирования на литоральном стенде (а – ВИТЭФ-1НТ, б – ВИТЭФ-1Б, в – У-30МЭС-5НТ, г – ВЭР-1)

При осмотре поверхности материалов, экспонировавшихся в эпилиторальном и стандартном стендах, непосредственный рост микромицетов обнаружен не был. С поверхности экспонировавшихся материалов методом отпечатка было выделено всего 5 видов микромицетов: *Cladosporium oxysporum* Berk. & M.A. Curtis, *Penicillium brevicompactum* Dierckx, *Penicillium citrinum* Thom, *Talaromyces rugulosus* (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad & Seifert, *Penicillium simplicissimum* (Oudem.) Thom. Причем рост данных грибов на поверхности чашек Петри представлял собой единичные колонии, что свидетельствует о бедном видовом составе микологической площадки на берегу Баренцева моря в условиях умеренного климата с морской атмосферой. Виды родов *Cladosporium* и *Penicillium* являются известными деструкторами полимерных материалов, в том числе и герметиков. *Penicillium citrinum* помимо деструкции способен окрашивать материалы в желто-розовые тона, портя внешний вид материала [11]. Данные микромицеты контаминировали поверхность герметиков. Их роль в деструкции материалов требует дополнительных исследований.

Как видно из таблицы 2, условная прочность образцов относительно исходных значений [12] у всех герметиков в той или иной мере была повышена, что, вероятнее всего, объясняется более полной вулканизацией под воздействием высокой влажности со временем.

Герметик ВИТЭФ-1НТ сильнее других марок герметиков набухает в воде, из-за чего значительно снизилось относительное удлинение, до 33,6% при экспонировании в литоральном стенде. У образцов из литорального и эпилиторального стендов по сравнению со стандартным снизилась прочность связи при отслаивании алюминиевого сплава Д16АТ на 29,9%.

Адгезия герметика ВИТЭФ-1Б в наименьшей степени подвержена влиянию литорали. В тоже время данная марка сильно набухает в воде, следствием чего является значительное снижение относительного удлинения (до 70%). Данный герметик, в исследуемых условиях, подвержен старению и деструкции, что видно по снижению его относительного удлинения до 70% и незначительному увеличению прочности на разрыв.

Таблица 2

Изучение свойств герметиков после 12 мес. натурной экспозиции

Функциональные свойства	Марка герметика	Стенд по ГОСТ 9.053	Литоральный стенд	Эпилиторальный стенд
Условная прочность при разрыве, %	ВИТЭФ-1НТ	20,70%	20,70%	23,30%
	ВИТЭФ-1Б	20,70%	20,70%	23,30%
	ВЭР-1	8,90%	8,90%	12,80%
	У-30МЭС-5НТ	3,20%	3,20%	6,30%
Относительное удлинение при разрыве, %	ВИТЭФ-1НТ	-27,50%	-33,60%	-24,60%
	ВИТЭФ-1Б	-50,30%	-64,40%	-71,90%
	ВЭР-1	-48,40%	-41,66%	-44,80%
	У-30МЭС-5НТ	-33,90%	-50,50%	-35,20%
Прочность связи при отслаивании от алюминиевого сплава Д16АТ, %	ВИТЭФ-1НТ	-18,50%	-29,90%	-4,20%
	ВИТЭФ-1Б	6,50%	-13,50%	-0,10%
	ВЭР-1	-7,00%	-59,90%	2,70%
	У-30МЭС-5НТ	10,30%	-15,90%	13,60%
Твердости по Шору А, %	ВИТЭФ-1НТ	1,40%	2,80%	4,20%
	ВИТЭФ-1Б	14,30%	15,60%	14,30%
	ВЭР-1	9,60%	11,80%	10,70%
	У-30МЭС-5НТ	10,50%	15,00%	10,50%

Герметик ВЭР-1 подвержен снижению прочности адгезии к подложке во влажных условиях литорали (до 59,9%) и снижению пластичности во всех исследуемых условиях. Данный герметик подвержен старению и деструкции – наблюдается снижение относительного удлинения до 41,6% и увеличение прочности на разрыв – до 12,8%.

Герметик У-30МЭС-5НТ показал снижение прочности адгезии к подложке во влажных условиях литорали. При экспонировании в стандартных стендах и в условиях эпилиторали прочность адгезии к подложке незначительно повысилась. Данный герметик, как и все предыдущие, в исследуемых условиях подвержен набуханию в воде и снижению относительного удлинения (до 50%), также он подвержен старению и деструкции – адгезия снизилась на 15,9%.

Итак, при натурной экспозиции на образцы материалов действует совокупность нескольких факторов – температура окружающей среды, скорость ветра, солнечная радиация, влажность и количество хлоридов, а также на материалы влияют различные микроорганизмы и макрофиты. Натурные испытания показали значительное различие в результатах между экспонированием в зоне литорали и эпилиторали в сравнении со стандартным стендом. При этом изменение свойств материалов с данными по обрастаниям не коррелируют. Видимо, массовое обрастание герметиков макрофитами и микроорганизмами не влияет на их физико-механические свойства в условиях исследования. В связи с чем методика оценки результатов по ГОСТ 9.053 при испытаниях в зонах литорали и эпилиторали должна главным образом опираться на изменения физико-механических свойств материалов, а не на визуальную оценку обрастания.

Литература

1. Полякова А.В., Кривушина А.А, Горяшник Ю.С., Яковенко Т.В. Защита авиационных материалов от микробиологического поражения // Новости материаловедения. Наука и техника, 2013. №3. С. 1–9.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. - №3. – С.2.
4. 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. В сборнике: Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции: посвящена 120-летию со дня рождения великого советского ученого, авиаконструктора Роберта Людвиговича Бартини). 2017. С. 21–30.
5. Бухарев Г.М. Оценка влияния микрофлоры на свойства материалов при испытаниях в натуральных условиях В книге: Системы контроля окружающей среды - 2016 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2016. С. 26.
6. Бухарев Г.М., Мокеева В.Л., Лияськина Е.В., Романов М.С. Микроскопические грибы, развивающиеся на некоторых неметаллических материалах в двух пунктах умеренно континентального климата в сравнении с условиями имитации влажного тропического климата В сборнике: Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы материалы Всероссийской конференции молодых ученых с

международным участием. Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН. 2016. С. 155–156.

7. Polyakova A.V., Goryashnik Y.S., Bukharev G.M., Eliseev O.A. Fungal resistance of sealants Polymer Science. Series D. 2016. Т. 9. № 2. С. 195–198.

8. ГОСТ 9.053-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы неметаллические и изделия с их применением. Метод испытаний на микробиологическую стойкость в природных условиях в атмосфере»

9. Каблов Е.Н., Полякова А.В., Васильева А.А., Горяшник Ю.С., Кириллов В.Н. Микробиологические испытания авиационных материалов //Авиационная промышленность. 2011. №1. С. 35–40.

10. ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов»

11. Лугаускас А.Ю., Микульскене А.И., Шляужене Д.Ю. Каталог микроицетов – биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. –340 с.

12. Мудров О.А., Савченко И.М., Шитов В.С. Справочник по эластомерным покрытиям и герметикам в судостроении. Ленинград «Судостроение» 1982. – 183 с.

УДК 544.08 544.7 548.3 543.08

Комплекс масс-спектрометрических методов исследования ингибиторов и продуктов коррозии на поверхности конструкционных материалов

Буряк А.К.¹, д.х.н.

akburyak@mail.ru

¹Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина (РАН) 119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4

Аннотация:

Предложен комплекс методов, состоящий из термодесорбционной масс-спектрометрии (ТДМС), хромато-масс-спектрометрии (ХМС) и активированной матрицей/поверхностью лазерной десорбцией/ионизацией МАЛДИ/ПАЛДИ для исследования ингибиторов и продуктов коррозии на поверхностях разного типа с целью предсказания коррозионной стойкости конструкционных материалов.

Ключевые слова:

масс-спектрометрия, хроматография, коррозия, поверхность.

Введение

Развитие и совершенствование современных физико-химических методов позволяет широко внедрить их в исследования коррозионных процессов, а их результаты использовать для предсказания стабильности и коррозионной стойкости материалов разного типа под воздействием разных видов коррозии [1–3].

Важной проблемой, возникающей при исследовании процессов старения, коррозии и биокоррозии является прогнозирование сроков развития этих процессов. Традиционный подход основывается на накоплении данных о натуральных испытаниях образцов разного типа с целью построения эмпирических зависимостей стойкости материала от времени [4].

Предпринимаются попытки изучения закономерностей протекания поверхностных реакций, приводящих к процессам разрушения, предполагая, что, опираясь на кинетические характеристики, можно будет прогнозировать стойкость материалов. Вместе с тем, получение информации о кинетических характеристиках реакций требует детального изучения механизмов реакций и идентификации промежуточных продуктов, часто лабильных и присутствующих в низких концентрациях [5–7]. Для их определения наиболее перспективно использовать хроматографические и масс-спектрометрические методы, традиционно считающиеся наиболее информативными среди физико-химических методов анализа [8].

Предложен комплекс методов, состоящий из термодесорбционной масс-спектрометрии (ТДМС), хромато-масс-спектрометрии (ХМС), для вариантов газовой хроматографии – масс-спектрометрии (ГХ-МС), высокоэффективной жидкостной хроматографии – масс-спектрометрии (ВЭЖХ-МС) и активированной матрицей/поверхностью лазерной десорбцией/ионизацией МАЛДИ/ПАЛДИ. Сочетание хроматографии и масс-спектрометрии позволяет совместить процессы разделения и идентификации компонентов сложных смесей. Особенностью выбранных методов является возможность анализировать все классы органических и неорганических соединений в широком диапазоне их молекулярных масс. Еще одним преимуществом комплекса методов является возможность исследования поверхностей разного типа, анализируя одновременно

органические и неорганические соединения. Исследуя модельные системы отработана методика совместного использования результатов и показаны преимущества, возникающие при комплексном использовании этих методов.

Изучены реальные образцы, подвергавшиеся воздействию коррозионно-активных компонентов ракетного топлива и выяснены причины развития коррозионных поражений.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны образцы сплава алюминия и магния, АМг-6, контактировавшие с компонентами ракетного топлива (КРТ), несимметричным диметилгидразином (НДМГ) и тетраоксидом азота (АТ), в различных условиях. Известно, что такие компоненты ракетного топлива и продукты их трансформации могут вызывать развитие различных типов коррозии [8]. Изучено взаимодействие с газовой и жидкой фазами топлива, влияние длительности контакта, условий слива и залива топлива.

Методы исследования

Газовая хроматография - масс-спектрометрия

В настоящей работе использовали хромато-масс-спектрометр JMS-D300 с хроматографом HP 5890, состыкованном с масс-спектрометром с помощью струйного сепаратора. Для хроматографического разделения использовали кварцевую капиллярную колонку 30 м × 0.5 мм со слабополярной жидкой неподвижной фазой ZB-5. Хроматографическое разделение проводили в следующем режиме: температура инжектора 280°C, скорость газа-носителя гелия 5 мл/мин, сброс 1:10. На основании проведенных ранее исследований выбран следующий режим программирования температуры: 30°C - 4 минуты изотерма - 6°/мин - 300°C - 5 минут изотерма.

Стандартные масс-спектрометрические условия: температура источника ионов 150°C, энергия ионизирующих электронов 70 эВ,

ускоряющее напряжение 3 кВ, диапазон массовых чисел от 40 до 450 m/z. Идентификация осуществлялась с помощью программы библиотечного поиска [9], либо на основании расшифровки масс-спектров, опираясь на основные закономерности фрагментации органических соединений под электронным ударом [10, 11]. Используемая библиотека содержит сведения о масс-спектрах 270 тысяч органических соединений.

Полученные в результате эксперимента хроматограммы представлены по полному ионному току (ПИТ), а для детального анализа использовали в виде масс-хроматограмм по отдельным ионам, характерным для исследуемых молекул. Для количественного анализа использовали внутренние стандарты – тетрахлорбензол и/или дейтеронафталин.

Для определения качественного и количественного состава органических соединений на поверхности исследуемые образцы обмывали растворителем, полученные смывы упаривали, добавляли стандарт и исследовали методом ГХ-МС.

Термодесорбционная масс-спектрометрия

Использовали масс-спектрометр JMS-D300 с термодесорбционной приставкой. При термодесорбционном исследовании образец помещали в кварцевый капилляр и нагревали со скоростью 20°C в минуту в интервале от 30 до 400–500°C. Масс-спектрометрические условия: температура источника ионов 150°C, энергия ионизирующих электронов 70 эВ, ускоряющее напряжение 3 кВ, диапазон массовых чисел от 40 до 450 m/z. Продукты термодесорбции поступают непосредственно в ионизационную камеру. Метод позволяет определять присутствующие на поверхности и в объеме материала соединения.

Масс-спектрометрия с матрично/поверхностно-активированной лазерной ионизацией/десорбцией (МАЛДИ/ПАЛДИ)

Использовали масс-спектрометр с источником на основе активированной поверхностью и матрицей лазерной десорбцией/ионизацией Bruker Daltonics Ultraflex II (Bruker, Германия),

оборудованный азотным лазером (длина волны 337,1 нм). В качестве инертной поверхности использовали стандартные мишени для нанесения образцов с 384 лунками (Bruker, Германия) выполненные из нержавеющей стали, специально подготовленной по методике фирмы «Bruker». Эксперименты проводились в режимах регистрации как положительных, так и отрицательных ионов. Параметры использованных режимов работы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики использованных режимов работы масс-спектрометра с поверхностно- и матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией
Bruker Daltonics Ultraflex II

Параметры, единица измерения	Режим регистрации положительных ионов	Режим регистрации отрицательных ионов
Напряжение на выталкивающем электроде, кВ	25	20
Доускоряющее напряжение, кВ	20	17,45
Напряжение на фокусирующей системе	10,50	7,50
Тормозящее напряжение на ионном зеркале, кВ	26,30	21
Отражающее напряжение на ионном зеркале, кВ	14,10	11

Для получения наиболее информативных масс-спектров использовали режим работы лазера: 50 выстрелов с частотой 20 Гц. Энергия лазерного импульса составляла 90–100 мкДж.

С поверхности материала проводили смыв ацетоном (2 мл на 30 см² площади). Полученный экстракт упаривали до 0,5 мл. Каплю полученного экстракта наносили на мишень, ожидали, пока растворитель испарится, после чего помещали каплю раствора матрицы (2,5-дигидроксибензойной кислоты или аналога) в ацетоне. Ожидали, пока растворитель матрицы также испарится, и проводили анализ.

Высокоэффективная жидкостная хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ВЭЖХ-МС) с электрораспылительной ионизацией

Эксперименты проводили на жидкостном хроматографе Agilent 1260 серии Infinity (Agilent Technologies, США) с градиентным насосом Quaternary Pump 1260, масс-спектрометрическим детектором высокого разрешения Maxis Impact (Bruker, Германия) с квадрупольным и времяпролетным масс-анализаторами. Метод ионизации: электрораспыление. Для обработки данных использовали программное обеспечение Bruker Compass Data Analysis 4.2. Хроматографическое разделение проводили на колонке Zorbax SB-C18 150 × 2.1 мм, 3.5 мкм, (Agilent, США). Для разделения использовали следующий градиент: 70% H₂O - 30% MeCN, в течение 20 минут последовательно до 30% H₂O - 70% MeCN, далее в течение 15 минут до 100% MeCN, после чего 5 мин 100% MeCN. Общее время анализа 40 минут. Расход подвижной фазы 1 мл/мин.

Детектирование проводили в диапазоне масс от 50 до 3000 Да (в режиме регистрации положительных ионов), напряжение на капилляре составляло 4.5 кВ. Для определения структуры исследуемых соединений использовали метод тандемной масс-спектрометрии. Масс-спектры вторичных ионов регистрировали со скоростью 4 Гц, газ-реактант - N₂, энергия соударения – 40 эВ. Для внутренней калибровки использовали формиат натрия. Точность определения масс составляла 0,001 Да. С поверхности материала проводили смыв ацетонитрилом или ацетоном (2 мл на 30 см² площади). Полученный экстракт упаривали до 0,5 мл. Полученный экстракт вводили в хроматограф и проводили анализ.

Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлено сравнение предлагаемых масс-спектрометрических методов, выполненное по результатам литературных и собственных исследований авторов [12–14]. Из таблицы видно, что каждый из методов имеет определенные ограничения, а их совместное применение позволяет охватить и широкий диапазон молекулярных весов, и

химических свойств исследуемых соединений, и обеспечить комплексный подход к их идентификации.

Таблица 2

Сравнение используемых масс-спектрометрических методов

Характеристики	ТДМС	ХМС	МАЛДИ/ПАЛДИ
Диапазон масс, Да	1 - 1000	1 - 800	1 - 500000
Химические свойства молекул	Нет ограничений, но возможна деструкция	Летучие и «полулетучие»	Любые, но необходимы матрицы или поверхность
Параметры идентификации	Энергия активации десорбции, характеристический ион, изотопный состав	Характеристический ион, изотопный состав, величины удерживания	Характеристический ион, изотопный состав
Пробоподготовка	Простая	Очень сложная	Сложная
Анализ основывается на	Масс-спектрах анализируемых молекул и продуктов деструкции	Масс-спектрах анализируемых молекул, величинах удерживания, двумерных масс-спектрах	Молекулярных ионах анализируемых молекул, двумерных масс-спектрах

Таким образом, планируя исследование ингибиторов и продуктов коррозии на поверхностях разного типа необходимо не только использовать все рекомендуемые методы, но и интерпретировать результаты исследования на основе комплексного подхода, основывающегося на сочетании результатов, полученных разными методами.

На примере сплава АМг-6 продемонстрированы возможности такого комплексного подхода.

Газовая хроматография - масс-спектрометрия

Для определения состава органических соединений на поверхности образцов проведено газохроматографическое – масс-спектрометрическое исследование смывов с поверхности. На рисунке 1 приведена хроматограмма смыва с поверхности образца, контактировавшего с горючим. На этой хроматограмме отсутствуют пики, соответствующие

КРТ и продуктам их трансформации. Наблюдаемые на этой хроматограмме пики принадлежат кремнийорганическим соединениям, используемым в колонке в качестве неподвижной жидкой фазы, примесям в растворителях, использованных для проведения смывов, добавленному стандарту и предельным углеводородам. Также в смыве присутствует незначительное количество фталата. Для подтверждения рассмотрены масс-хроматограммы по характеристическим ионам предельных углеводородов ($m/z=57$), фазы колонки ($m/z=73$), фталатов ($m/z=149$) и внутренних стандартов (тетрахлорбензола $m/z=216$ и дейтеронафталина $m/z=136$). Пик с временем выхода 52 мин. соответствует сквалену – одному из распространенных компонентов смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых при обработке металлов.

Отсутствие в смывах с образцов пиков, соответствующих КРТ и продуктам его трансформации подтверждено отсутствием пиков на масс-хроматограммах по характеристическим ионам КРТ ($m/z=58, 59$) и основных продуктов его трансформации ($m/z=83, 97, 74$).

Аналогичные хроматограммы получены для всех исследованных образцов. Присутствие в смывах предельных углеводородов и фталатов может объясняться наличием различных смазок и других технологических жидкостей на поверхности исследуемых образцов. В том числе нельзя отрицать присутствие на поверхности каких-либо органических покрытий, нанесенных при производстве и либо несмываемых растворителями, либо нехроматографируемых в условиях газовой хроматографии.

Таким образом, на основании ГХ-МС данных, можно утверждать, что на поверхности исследованных образцов не содержится продуктов трансформации КРТ и органических соединений, которые могли образоваться в результате взаимодействия поверхности с КРТ, в количестве, превышающем $0,1 \text{ мг/см}^2$.

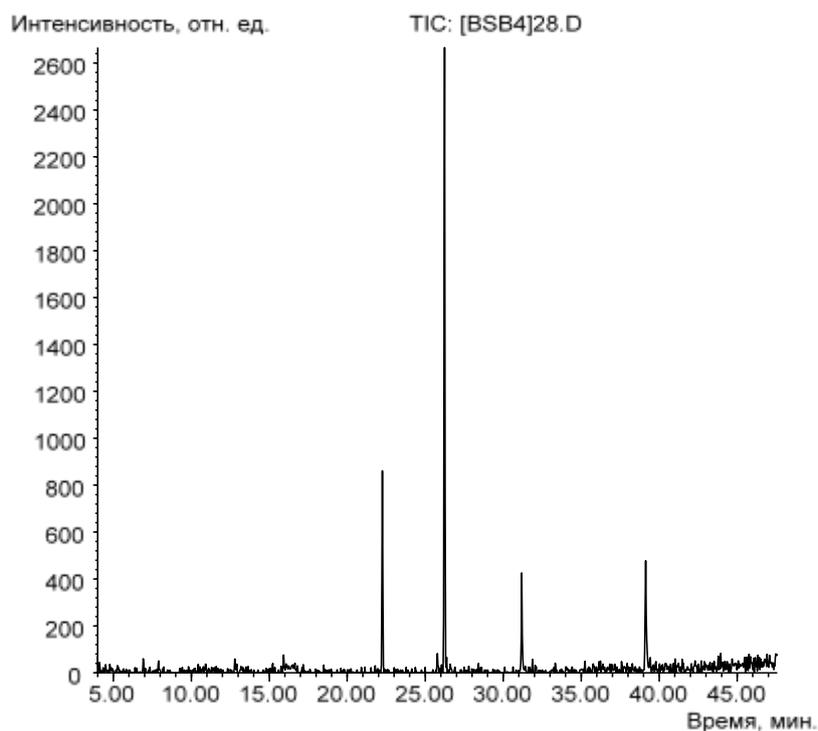


Рис. 1 – Хроматограмма по ПИТ смыва с поверхности образца, контактировавшего с НДМГ

Термодесорбционное масс-спектрометрическое исследование

Для обнаружения на поверхности образцов КРТ и продуктов их трансформации и определения глубины проникновения органических загрязнений в материал бака проведено исследование послойных соскобов с поверхности образцов с шагом 10 мкм. Получены термограммы по ПИТ послойных соскобов с образца контактировавшего с горючим. Изучены масс-спектры, соответствующие максимумам выделения из соскоба. Первый пик, при температуре около 100°C, соответствует десорбции физически адсорбированной воды. При более высоких температурах наблюдается деструкция и пиролиз высокомолекулярных органических соединений, что видно из масс-термограмм по характеристическим ионам воды ($m/z=18$), предельных углеводородов ($m/z=57$) и углекислого газа ($m/z=44$), который является основным продуктом пиролиза. Продукты трансформации топлива и вещества, которые могли образоваться в

результате взаимодействия поверхности с горючим, отсутствуют. Также из выяснено, что больше всего органических загрязнений обнаружено в первом слое. Однако и в остальных слоях они также наблюдаются, хотя и в меньших количествах.

На основании этих данных можно оценить глубину проникновения коррозионного поражения в глубину материала величиной 40–50 мкм.

Аналогичные результаты получены и для всех других исследованных образцов. На поверхности образцов отсутствуют продукты трансформации топлива и вещества, которые могли образоваться на поверхности в результате взаимодействия с топливом.

Исследование методом масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной ионизацией/десорбцией

При регистрации положительных ионов получили масс-спектр в котором обнаружили пики соединений с m/z 773, 869, 927, 985, 1043, 1101, 1159, 1217, 1275 ($\Delta=58$). По-видимому, эти пики соответствуют квазимолекулярным ионам гомологов соединений, образующихся при контакте ацетона с образцом, поскольку таких соединений не образуется при смывах ацетонитрилом. Так как разница молекулярных масс указанных соединений постоянна, можно предположить, что они представляют собой олигомеры с единичным звеном, имеющим массу 58 Да, например, ацетон. Такие олигомеры образуются при кислотной или щелочной полимеризации ацетона, вызываемой, в данном случае, остатками продуктов трансформации КРТ.

Высокоэффективная жидкостная хроматография с масс-спектрометрическим детектированием с электрораспылительной ионизацией

На полученной хроматограмме, рисунок 2, присутствует около 20 пиков, которые можно отнести к нескольким сериям полимер-гомологов. Самые интенсивные сигналы в масс-спектрах компонентов,

соответствующих пикам 1-3, имеют m/z 325, 383 и 441 Да, соответственно, так что разности их массовых чисел составляют 58 Да. Далее на хроматограмме наблюдаются пики (№№ 4, 8-12, 14, 17), в масс-спектрах которых наиболее интенсивные сигналы имеют другие массы (516, 574, 632, 690, 748, 806, 864, 922 Да, соответственно), однако их разности по-прежнему составляют 58 Да. Важно отметить, что для одних и тех же соединений в масс-спектрах наблюдаются сигналы как первой, так и второй последовательностей. Установлено, что наиболее интенсивные сигналы в масс-спектрах первой последовательности соединений соответствуют однозарядным ионам типа $[M+H]^+$, в то время как наиболее интенсивные ионы из второй последовательности соответствуют аддуктам с ионом аммония: $[M+NH_4]^+$. Для более удерживаемых компонентов (пики 19, 21, 24 на хроматограмме рисунок 2) в масс-спектрах обнаружены интенсивные пики двухзарядных ионов (m/z 491, 520 и 549, соответственно), разности массовых чисел различных соединений составляют $29 = 58/2$ Да. Эти пики соответствуют двухзарядным ионам типа $[M+H+NH_4]^{2+}$, в то время как для наиболее удерживаемых компонентов (пики 26, 28, 30, 32-34) самые интенсивные сигналы соответствуют двухзарядным ионам $[M+2NH_4]^{2+}$ (m/z 586, 615, 644, 673, 702, 731).

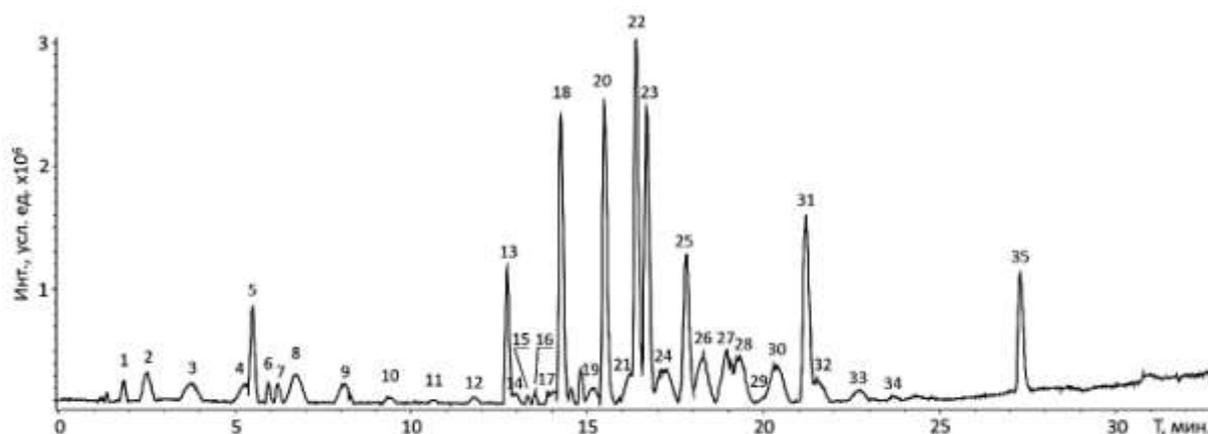


Рис. 2 – Хроматограмма смыва с поверхности бака, контактировавшего с горючим

Хроматографические пики с номерами 5, 13, 18, 20, 22, 23, 25, 31, 35 соответствуют фталатам, алкилсебацатам и крезилфосфатам. Все эти вещества используются как компоненты смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых на стадиях производства и эксплуатации изделий.

Выводы

На основании сопоставления результатов всех исследований и комплексного их рассмотрения можно сделать вывод, что на поверхности образцов отсутствуют КРТ и продукты их трансформации, а также вещества, которые могли образоваться при взаимодействии материала изделия с КРТ, в количествах, превышающих 0,1 мг/см². Глубина коррозионного поражения всех поверхностей бака горючего не превышает 50 мкм. Присутствуют примеси органических загрязнений, представляющие собой компоненты смазочно-охлаждающих жидкостей, используемые при производстве и эксплуатации изделия. На основании химического строения обнаруженных примесей можно утверждать, что они не представляют опасности для коррозионной стойкости изделия.

Литература

1. Буряк А.К., Пыцкий И.С., Сердюк Т.М., Ульянов А.В. Масс-спектрометрия для исследований коррозии и ингибиторов коррозии. Коррозия: материалы, защита. 2011. № 4. С. 6–12.
2. Буряк А.К., Сердюк Т.М. Физико-химические основы применения масс-спектрометрии с инициированной матрицей / поверхностью лазерной десорбцией / ионизацией для исследования ингибиторов. Коррозия: материалы, защита. 2010. № 9. С. 38–47.
3. Буряк А.К., Сердюк Т.М., Ульянов А.В. Физико-химические основы применения термодесорбционной масс-спектрометрии для

исследования ингибиторов и продуктов коррозии. Коррозия: материалы, защита. 2008. № 2. С. 38–47.

4. Атмосферная коррозия и защита металлов. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Кузнецов Ю.И., 2016, Першин Р.В Тамбов, 554 с.

5. Avdeev Y.G., Kuznetsov Y.I., Buryak A.K. Inhibition of steel corrosion by unsaturated aldehydes in solutions of mineral acids. Corrosion Science. 2013. Vol. 69. P. 50–60.

6. Буряк А.К., Пыцкий И.С., Сердюк Т.М., Ульянов А.В. Сочетание термодесорбции и инициированной матрицей/поверхностью лазерной десорбции/ионизации при масс-спектрометрическом исследовании поверхности конструкционных материалов Хімія, фізика та технологія поверхні. 2011. Т.2. № 3. С. 354–360.

7. Томашев Н.Д. и Чернова Г.П. «Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы», Металлургия, Москва, 1986 г.

8. Буряк А.К., Сердюк Т.М. Хромато-масс-спектрометрия в ракетно-космической отрасли. Успехи химии. 2013. Т. 82, № 4, С. 366–392.

9. Библиотека масс-спектров Willey275.

10. Полякова А.А., Хмельницкий Р.А. Масс-спектрометрия в органической химии. Л.: 1972.

11. Вульфсон Н.С., Заикин В.Г., Микая А.И. Масс-спектрометрия органических соединений. М.: Химия ,1976, 384 с.

12. Пыцкий И.С., Буряк А.К. Применение масс-спектрометрии с матрично- и поверхностно-активированной лазерной десорбцией/ионизацией для исследования поверхности материалов АМГ-6 И АД-0. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47. № 6. С. 630–635.

13. Обнаружение нитробензойных кислот и их солей на поверхностях конструкционных материалов методом масс-спектрометрии. Ярцев С.Д.,

Пыцкий И.С., Белова А.С., Буряк А.К. Журнал аналитической химии. 2018. Т. 73. № 1. С. 46–51.

14. Пыцкий И.С., Буряк А.К. Масс-спектрометрическое исследование химии поверхности сплавов Ад-0 и АМг-6 методом лазерной десорбции/ионизации. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47. № 1. С. 100–105.

УДК 620.1:663.18

Натурные испытания лакокрасочных покрытий на биологическое повреждение и обрастание в условиях умеренного холодного и теплого влажного климата Европейской части России

Бухарев Г.М.¹; Бобырева Т.В.¹; Новикова Т.А.¹

george@boukharev.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Аннотация:

Для обеспечения надежной защиты материалов требуется проверка применяемых лакокрасочных покрытий на стойкость к микробиологическому воздействию. Для наиболее точной оценки помимо лабораторных испытаний в строго контролируемых условиях необходимо проводить натурные испытания, где происходит комплексное воздействие на образцы как абиогенных, так и биогенных факторов. В данной работе представлены результаты сравнительных натурных испытаний двух лакокрасочных покрытий: фторполиуретановой эмали ВЭ-69 и акрилстирольной эмали АС-1115. Испытания проводились одновременно на трех испытательных станциях в двух климатических зонах по ГОСТ 16350 в течение 1 года. По результатам испытания после 1 года испытания были дана оценка изменениям механических и декоративных свойств.

Ключевые слова:

биодеструкторы, поражаемость, микроорганизмы, лакокрасочные покрытия, испытания в натурных условиях.

Введение

В связи с интенсификацией применения гражданской и военной авиации, в том числе гидроавиации, производители и эксплуатанты авиационной техники непрерывно ужесточают требования ко всем применяемым материалам [1–3]. Касается это и такого параметра как биологическая стойкость материалов, как частного случая климатической стойкости [4–7]. Одним из первых барьеров на пути предотвращения коррозии и старения материалов являются лакокрасочные покрытия (ЛКП). Для адекватной биологической защиты подлежащих материалов лакокрасочные покрытия сами по себе должны обладать биологической стойкостью. Для её обеспечения существуют корпус нормативной документации, регламентирующей испытания на микробиологическую стойкость. В Российской Федерации для этих целей могут служить следующие стандарты: ГОСТ 9.049-91. ЕСЗКС. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов [8]; ГОСТ 9.050-75. ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Методы лабораторных испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов [9]; ГОСТ 9.053-75. ЕСЗКС. Материалы неметаллические и изделия с их применением. Метод испытаний на микробиологическую стойкость в природных условиях в атмосфере [10]; ГОСТ 28206-89, МЭК 68-2-10-88. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание J и руководство. Грибостойкость [11]; ГОСТ Р 57859-2017. Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов [12]; ГОСТ Р МЭК 60068-2-10-2009. Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-10. Испытания. Испытание J и руководство. Грибостойкость [13]. При этом только ГОСТ 9.050 является специализированным стандартом, ориентированным на испытание ЛКП и предусматривающим использование тех микроорганизмов, которые могут

повреждать лаки, краски, эмали особенно интенсивно, по сравнению с набором микроорганизмов, используемых в остальных стандартах. В США — лидере блока НАТО — нормативная база регламентирующая испытание ЛКП на биологическую стойкость более развитая и включает: ASTM D3273-12 Стандартный метод испытаний на стойкость к плесневым грибам интерьерных покрытий в термостате [14]; ASTM D3274-09e1 Стандартный метод испытаний для оценки степени поверхностного повреждения лакокрасочных покрытий грибковым или водорослевым ростом, или накоплением почвы и грязи [15]; ASTM D5588-97(2008) Стандартный метод определения микробного поражения лакокрасочных материалов и покрытий [16]; ASTM D5589-09 Стандартный метод определения стойкости лакокрасочных покрытий к водорослевому обесцвечиванию [17]; ASTM D5590-00(2010) Метод ускоренного четырехнедельного определения стойкости лакокрасочных покрытий к грибковому поражению на агаризованных питательных средах [18]; ASTM D6329-98(2008) Руководство по совершенствованию методологии оценки способности материалов для внутренней отделки поддерживать микробный рост в термостатах [19]; ASTM G21-15 Метод определения стойкости синтетических полимерных материалов к грибам) [20]; ASTM G29-96(2010) Метод определения стойкости полимерных пленок к водорослям [21].

В отличие от отечественной, в американской нормативной документации уделяется достаточное внимание оценке воздействия водорослей на ЛКП, а не только лишь микроскопическим грибам.

При реальной эксплуатации техники на материалы никогда не воздействуют только живые организмы, или только физические и химические климатические факторы, это — всегда комплексное воздействие [22–24], помимо лабораторных испытаний требуется испытание материалов в природных (натурных условиях). Такими

стандартами являются отечественный ГОСТ 9.053 [10] и ASTM D3274 [15]. При этом ГОСТ 9.053 является неспециализированным стандартом, позволяющим по его методике проводить испытания любых неметаллических материалов в условиях ангарного хранения, а стандарт ASTM D3274, хотя и предполагает поверхностное воздействие различных организмов, по сути, регламентирует только оценку поражения поверхности материалов, но не саму методику испытания [15]. Учитывая, что современные ЛКП, например эмали ВЭ-69 и АС-1115, являются достаточно универсальным и сфера их применения не ограничивается только авиацией и гидроавиацией [25–30], а распространяется и на амфибийную технику и на плавсредства [29], а так же учитывая тот факт, что техника, особенно это касается авиационной, может эксплуатироваться в различных регионах Земного шара с различными биогеоклиматическими условиями, вопрос разработки адекватной методологии комплексных натуральных испытаний стоит особенно остро.

В данной работе приведены результаты комплексных годовых натуральных испытаний двух распространённых эмалей ВЭ-69 и АС-1115. Данные системы ЛКП предназначены для антикоррозионной защиты конструкций из алюминиевых, магниевых сплавов и сталей, а также полимерных композиционных материалов от атмосферных воздействий и эксплуатирующихся при температуре от минус 60 до плюс 120°C во всеклиматических условиях. По химической структуре ВЭ-69 представляет собой фторполиуретановое соединение, АС-1115 — акрилстирольное соединение.

Исследования

Образцы ЛКП экспонировались в микологических стендах, выполненных по ГОСТ 9.906 [30] на микологических площадках по ГОСТ 9.053 [10] в теплом влажном климате Тисо-Самшитовой рощи Кавказского заповедника (далее *Сочи*); в умеренном климате на Звенигородской

коррозионной станции ИФХЭ РАН (далее ЗКС); в умеренном климате с морской атмосферой на побережье Баренцева моря (далее: БМ, лес). Так же на побережье Баренцева моря были организованы две площадки для оценки влияния биологических и климатических факторов у уреза воды: в эпилиторальной зоне (зона заплеска брызг, далее: БМ, эпилитораль) в микологическом стенде, выполненном по ГОСТ 9.906 и в литоральной зоне (приливно-отливной зоне, далее: БМ, литораль). Экспозиция была начата 30 мая 2017 г и окончена 30 мая 2018 г. При этом 1/3 образцов с литорального стенда снесло на дно в результате волнового воздействия начале декабря 2017 г. До окончания экспозиции они пролежали на дне в верхней сублиторальной зоне (на глубине 1 м ниже точки сизигийного отлива, далее БМ, море).

Фотографии образцов ЛКП после годовой экспозиции, а именно эмали АС-1115 представлены на рис.1, эмали ВЭ-69 — на рис. 2.

По результатам натурной экспозиции была произведена оценка биологической пораженности снятых образцов ЛКП по ГОСТ 9.048 согласно п.5.1.2 ГОСТ 9.053. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Оценка пораженности образцов материалов, после 12 мес. экспонирования в натуральных условиях на 5 микологических площадках, баллы

Материалы	ЗКС	БМ, Литораль	БМ, Эпилитораль	БМ, Море	БМ, Лес	Сочи
ЛКП ВЭ-69	0	5	0	5	0	1
ЛКП АС-1115	0	5	0	5	0	1

По результатам оценки биологической пораженности была выявленная пораженность только образцов, экспонировавшихся в Кавказском заповеднике (оценка по 1 баллу) и находившихся на литорали и в море на БМ (5 баллов). При этом на образцах, экспонировавшихся на литорали, присутствуют водоросли из отдела *Chlorophyta* и *Cyanophyta*

(рис. 1В, 1Г, 2В). На образцах, экспонировавшихся в сублиторали – присутствует микробный мат (рис. 1Д, 2Г, 2Д), при этом на образце АС-1115, экспонировавшихся на литорали наблюдается несимметричное обрастание: биомасса на одной из сторон (рис. 1Г) существенно превышает биомассу на второй из сторон (рис. 1В).

После оценки биологического повреждения все образцы были проверены на предмет изменений служебных характеристик: цветового различия, внешнего вида и адгезии, относительно контрольных образцов. Цветовое различие оценивалось по ГОСТ 9.407 [31] с помощью спектроколориметра X-Rite SP62, внешний вид и адгезия оценивались по ГОСТ 15140 метод 4 [32].

Результаты проведенных измерений представлены в Таблице 2.

В результате анализа полученных данных следует, что при испытании образцов по ГОСТ 9.053 (ЗКС; Сочи; БМ, лес) наибольшие изменения функциональных свойств наблюдалось на площадке в Сочи, при учете степени биологического повреждения в 1 балл, такие изменения вероятнее всего следует приписать интенсивному воздействию солнечного света, в силу большего количества попадаемого ультрафиолетового излучения солнца в силу географического расположения ближе к экватору. Экспозиция на эпилиторальном стенде по степени своего воздействия по совокупному воздействию на обе эмали занимает промежуточное положение между экспозициями в умеренно холодном климате (ЗКС и БМ, лес) и экспозицией в теплом влажном климате (Сочи). Такой эффект, возможно, возникает в силу того, что в данных условиях на этой площадке отсутствует растительность, которая ограничивает дозу падающего на образцы солнечного света.



Рис. 1-А – Контрольный образец
АС-1115



Рис. 1-Б – Натурная экспозиция АС-1115
на ВНИИГ БМ лес 12 мес.



Рис. 1-В – Натурная экспозиция АС-1115
на ВНИИГ БМ литораль 12 мес. Сторона 1



Рис. 1-Г – Натурная экспозиция АС-1115
на ВНИИГ БМ литораль 12 мес. Сторона 2



Рис. 1-Д – Натурная экспозиция АС-1115
на ВНИИГ БМ море 12 мес.



Рис. 1-Е – Натурная экспозиция АС-1115
на ВНИИГ БМ эпилитораль 12 мес.



Рис. 1-Ж – Натурная экспозиция АС-1115 на ЗКС ИФХЭ лес 12 мес.



Рис. 2-А – Контрольный образец ВЭ-69



Рис. 2-Б – Натурная экспозиция ВЭ-69 на ВНИИГ БМ лес 12 мес.



Рис. 2-В – Натурная экспозиция ВЭ-69 на ВНИИГ БМ литораль 12 мес.



Рис. 2-Г – Натурная экспозиция ВЭ-69 на ВНИИГ БМ море 12 мес. Сторона 1



Рис. 2-Д. Натурная экспозиция ВЭ-69 на ВНИИГ БМ море 12 мес. Сторона 2



Рис. 2-Е. Натурная экспозиция ВЭ-69 на ВНИИГ БМ эпиликтораль 12 мес.



Рис. 2-Ж – Натурная экспозиция ВЭ-69 на ЗКС ИФХЭ лес 12 мес.

Существенные изменения свойств образцов, экспонировавшихся на литорали и в море (сублиторали) в первую очередь объясняется активным ростом организмов, которые в процессе своей жизнедеятельности содержат и выделяют во вне большое количество пигментированных

веществ, осаждаемых со временем на поверхности субстрата, т.е. в данном случае испытываемых эмалей.

Таблица 2

Цветовое различие, ЛКП ВЭ-69 и АС-1115 после 12 мес. натурной экспозиции

Система ЛКП	Точки экспозиции		Цветовое различие, $\Delta E_{\text{средн.}}$
Эмаль ВЭ-69	ЗКС		1,97
	Сочи		2,04
	БМ	литораль	3,57
		эпилитораль	2,05
		лес	1,98
море		6,46	
Эмаль АС-1115	ЗКС		2,83
	Сочи		3,79
	БМ	литораль	4,78
		эпилитораль	3,12
		лес	2,32
море		4,42	

По результатам проведенной работы, следует признать не применимость подходов предлагаемых ГОСТ 9.053 для испытания лакокрасочных покрытий, и острой необходимости разработки регламентируемых испытаний для оценки стойкости ЛКП к пограничным вода-воздух условиям.

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Полякова А.В., Васильева А.А., Горяшник Ю.С., Кириллов В.Н. Микробиологические испытания авиационных материалов // Авиационная промышленность. 2011. №1. С. 35–40.
3. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системе // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С 17–20.
4. 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. В сборнике: Климат-2017. Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции: посвящена 120-летию со дня рождения великого советского ученого, авиаконструктора Роберта Людвиговича Бартини). 2017. С. 21–30.
5. Бухарев Г.М. Оценка влияния микрофлоры на свойства материалов при испытаниях в натуральных условиях В книге: Системы контроля окружающей среды - 2016 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2016. С. 26.
6. Бухарев Г.М., Мокеева В.Л., Лияськина Е.В., Романов М.С. Микроскопические грибы, развивающиеся на некоторых неметаллических материалах в двух пунктах умеренно континентального климата в сравнении с условиями имитации влажного тропического климата В сборнике: Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы материалы Всероссийской конференции молодых ученых с

международным участием. Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН. 2016. С. 155–156.

7. Polyakova A.V., Goryashnik Y.S., Bukharev G.M., Eliseev O.A. Fungal resistance of sealants Polymer Science. Series D. 2016. Т. 9. № 2. С. 195–198.

8. ГОСТ 9.049-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов.

9. ГОСТ 9.050-75. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Методы лабораторных испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов.

10. ГОСТ 9.053-75. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы неметаллические и изделия с их применением. Метод испытаний на микробиологическую стойкость в природных условиях в атмосфере.

11. ГОСТ 28206-89, МЭК 68-2-10-88. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание J и руководство. Грибостойкость.

12. ГОСТ Р 57859-2017. Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов.

13. ГОСТ Р МЭК 60068-2-10-2009. Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-10. Испытания. Испытание J и руководство. Грибостойкость.

14. ASTM D3273-12 Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber (Стандартный метод испытаний на стойкость к плесневым грибам интерьерных покрытий в термостате).

15. ASTM D3274-09e1 ASTM D3274-09e1. Standard Test Method for Evaluating Degree of Surface Disfigurement of Paint Films by Fungal or Algal

Growth, or Soil and Dirt Accumulation (Стандартный метод испытаний для оценки степени поверхностного повреждения лакокрасочных покрытий грибковым или водорослевым ростом, или накоплением почвы и грязи) (для наружных испытаний).

16. ASTM D5588-97(2008) Standard Test Method for Determination of the Microbial Condition of Paint, Paint Raw Materials, and Plant Areas (Стандартный метод определения микробного поражения лакокрасочных материалов и покрытий).

17. ASTM D5589-09 Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Algal Defacement (Стандартный метод определения стойкости лакокрасочных покрытий к водорослевому обесцвечиванию).

18. ASTM D5590-00(2010) Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay (Метод ускоренного четырехнедельного определения стойкости лакокрасочных покрытий к грибковому поражению на агаризованных питательных средах).

19. ASTM D6329-98(2008) Standard Guide for Developing Methodology for Evaluating the Ability of Indoor Materials to Support Microbial Growth Using Static Environmental Chambers (Руководство по совершенствованию методологии оценки способности материалов для внутренней отделки поддерживать микробный рост в термостатах).

20. ASTM G21-15 Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi (Метод определения стойкости синтетических полимерных материалов к грибам).

21. ASTM G29-96(2010) Standard Practice for Determining Algal Resistance of Plastic Films (Метод определения стойкости полимерных пленок к водорослям).

22. Allsopp D., Seal K.J., Gaylarde C.C. Introduction to Biodeterioration, -

- 2nd ed.

23. Африкян Э.Г. Некоторые актуальные вопросы микробных повреждений неметаллических материалов/В кн. Актуальные вопросы биоповреждений и защита материалов, изделий и сооружений. М. 1989. С. 19–25.

24. Гумаргалиева К.З., Калинина И.Г. Кинетические аспекты биodeградируемости полимерных материалов//Коррозия: материалы, защита, 2013, №4. С. 39–47.

25. Молотова В.А. и др. Прогрессивные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических поверхностей. // Авиационная промышленность. 1982. №8.

26. Андреева Н.П., Новикова Т.А., Семенова Л.В., Николаев Е.В. Влияние климатических факторов на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий, предназначенных для защиты внешней поверхности самолетов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2014. №10. С. 32–35.

27. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Прогрессивные системы лакокрасочных покрытий для защиты конструкций различной природы. // Промышленная окраска 2015. №02. С. 44–45.

28. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Николаев Е.В., Славин А.В. Влияние климатических факторов тропического и умеренного климата на свойства лакокрасочных покрытий на уретановой основе // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. №4. С. 24–28.

29. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А., Малова Н.Е. Развитие авиационных лакокрасочных материалов // Все материалы: Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 49–54.

30. ГОСТ 9.906-83. Единая система защиты от коррозии и старения. Станции климатические испытательные. Общие требования.

31. ГОСТ 9.407-2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида.

32. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии.

УДК 621.794.6

Использование неорганического композиционного покрытия для ремонта противокоррозионной защиты стальных конструкций

Дёмин С.А.¹, Виноградов С.С.¹, д.т.н.; Вдовин А.И.

admin@viam.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва

Коррозионные поражения являются основной причиной разрушения металлических конструкций и сооружений. Это приводит к большим экономическим потерям в связи с тем, что стоимость металлоконструкций, как правило, превышает стоимость самого металла. Особое значение имеют коррозионные поражения, возникающие на окрашенных стальных изделиях, так как в этом случае коррозия основного металла продолжается под лакокрасочным покрытием и может привести к существенному нарушению механических свойств металла, прежде чем она будет обнаружена. По причине позднего обнаружения коррозии стали после отделения окрасочного слоя обнаруживаются существенные коррозионные поражения с большим количеством продуктов коррозии (ржавчины). В этом случае восстановление лакокрасочного покрытия на стальном изделии сопряжено не только с удалением старого лакокрасочного покрытия и продуктов коррозии стали, но и с необходимостью восстановления противокоррозионной защиты.

Наиболее широко применяемые гальванические цинковые и

кадмиевые покрытия, а также алюминидные покрытия обладают рядом существенных недостатков, одним из которых является невозможность нанесения защитного покрытия на крупные металлоконструкции или отдельные их элементы без демонтажа конструкции.

Во ФГУП «ВИАМ» разработано неорганическое композиционное покрытие, которое обладает высокой защитной способностью (более 10000 ч в КСТ) в условиях атмосферной коррозии при температурах эксплуатации вплоть до 460°C. Покрытие наносится на стальные детали методом пневматического распыления с последующей сушкой при 110°C и лёгкой шлифовкой. Покрытие обладает ремонтпригодностью. Ценные качества неорганического композиционного покрытия – невысокая стоимость, устойчивость к влажным и агрессивным средам, возможность его применения во всеклиматических условиях, в контакте с различными минеральными маслами, простота его нанесения позволяют применять такое покрытие для нанесения противокоррозионной защиты без демонтажа всей конструкции.

Главной трудностью в этом случае является удаление продуктов коррозии стали без образования плотной фосфатной плёнки, которая исключает электрический контакт неорганического композиционного покрытия со стальной основой.

Большинство известных средств (паст, растворов, преобразователей ржавчины и т.п.) для удаления продуктов коррозии низкоуглеродистой стали в своём составе содержат фосфорную кислоту, в которой скорость удаления ржавчины и окалины сопоставима со скоростью их растворения в растворе соляной кислоты и существенно выше, чем в растворах серной кислоты. Причём растворы соляной кислоты обладают резким удушливым запахом. Кроме того в растворе фосфорной кислоты практически отсутствует растравливание стали. Результатом использования таких средств для удаления ржавчины является образование на стальной

поверхности фосфатного слоя. Этот слой является хорошей основой для нанесения лакокрасочных покрытий. Но в случае восстановления противокоррозионной защиты с помощью неорганического композиционного покрытия такое свойство известных средств является неприемлемым. В силу своего высокого электросопротивления фосфатный слой прерывает электрический контакт неорганического композиционного покрытия со сталью и тем самым исключает электрохимическую защиту. Поэтому для удаления продуктов коррозии стали при подготовке повреждённой поверхности к нанесению на неё неорганического композиционного покрытия разработали пасту на основе смеси серной и соляной кислот с добавлением ингибитора коррозии, комплексообразователя, смачивателя и загустителя.

В процессе исследований были выбраны составы с общим содержанием кислот, не превышающим 100 г/л. В качестве загустителя применялся аэросил марки А380 с концентрацией 150 г/л. Для улучшения смачиваемости поверхности в пасту добавлялся ОС-20 с концентрацией 1 г/л. Для подавления реакции травления стальной основы паста содержит ингибитор коррозии, в нашем случае уротропин в количестве 20 г/л. Для повышения растворимости продуктов коррозии в кислотном растворе в него вводили лиганды. Образование прочных комплексов с соединениями железа способствует связыванию продуктов коррозии стали в растворимые соединения и, как следствие, повышает эффективность применяемых кислот. В качестве лигандов были использованы щавелевая кислота и трилон Б в количестве 35 г/л.

Результаты измерений показывают, что величина электросопротивления поверхности после её обработки пастой незначительно превышает величины электросопротивления поверхности образца после пескоструйной очистки. Это свидетельствует о полном удалении продуктов коррозии и отсутствии пассивирующих оксидных или

солевых плёнок, которые могли бы затруднить электрический контакт поверхности стали с защитным неорганическим композиционным покрытием. Следовательно, неорганическое композиционное покрытие, нанесённое на ржавую стальную поверхность после обработки разработанной пастой, будет выполнять электрохимическую защиту стали в атмосферных условиях.

Проведённые ускоренные коррозионные испытания в КСТ образцов с неорганическим композиционным покрытием, нанесённым на очищенную от ржавчины разработанной пастой поверхность стальной детали, показали высокую защитную способность: продуктов коррозии стали не обнаружено после 5000 ч (около 7 месяцев) испытаний.

Аналогичным способом проводят восстановление противокоррозионной защиты при местном поражении коррозией оцинкованной стальной поверхности.

Таким образом, неорганическое композиционное покрытие в силу своих высоких защитных свойств и простотой нанесения пригодно не только для ремонта самого себя, но и для восстановления утраченной противокоррозионной защиты.

УДК 620.193.21

Антикоррозионная защита самолета-амфибии Бе-200

Дюдин В.Б.¹

¹ПАО ТАНТК им. Г.М. Бериева, г. Таганрог

Аннотация

В докладе описаны примененные схемы антикоррозионной защиты самолета Бе-200, рассмотрены материалы и системы ЛКП применяемые в их конструкции.

Коррозионная стойкость самолета амфибии Бе-200 достигается путем принятие мер по защите конструкции на всех этапах создания и эксплуатации с учетом ранее накопленного опыта при проектировании, строительстве и эксплуатации самолетов амфибий Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40.

Основными критериями коррозионной стойкости являются применяемые в конструкции самолета материалы, виды полуфабрикатов, системы антикоррозионной защиты, уход в эксплуатации.

Выбор конструкционных материалов производится из условий обеспечения заданного ресурса, надежности, долговечности конструкции, коррозионной стойкости в морских условиях, весовой отдачи, с учетом условий эксплуатации.

Выбор защитных покрытий осуществляется исходя из условий эксплуатации. Для деталей из алюминиевых сплавов анодное оксидирование, для деталей из сталей кадмиевое покрытие с последующим нанесением систем ЛКП на основе эпоксидных грунтовок и

эмалей. Детали из титановых сплавов подвергаются импульсному анодированию. Большое внимание уделяется защите от контактной коррозии. Наносятся профилактические составы в местах наиболее подверженных коррозионным поражениям.

Полученный опыт в результате мониторинга самолетов амфибий Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40 в эксплуатации, позволил разработать эффективную противокоррозионную защиту самолета Бе-200.

Ключевые слова:

антикоррозионная защита, Бе-200

Особенности эксплуатации самолета Бе-200 в различных акваториях с взлетом и посадкой на воду, с забором воды на глиссировании, в странах с различным климатом, тушение лесных пожаров – как следствие полеты на малых высотах при циклическом воздействии температур предъявляют особые требования к разработке антикоррозионной защиты.

Коррозионная стойкость самолета амфибии Бе-200 достигается путем принятия мер по защите конструкции на всех этапах создания и эксплуатации с учетом ранее накопленного опыта при проектировании, строительстве и эксплуатации самолетов амфибий Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40.

Основными критериями коррозионной стойкости являются применяемые в конструкции самолета материалы, виды полуфабрикатов, системы антикоррозионной защиты, уход в эксплуатации.

На схеме представлено формирование антикоррозионной защиты самолета Бе-200 (рис. 1).

Выбор конструкционных материалов производится из условий обеспечения заданного ресурса, надежности, долговечности конструкции, коррозионной стойкости в морских условиях, весовой отдачи, с учетом условий эксплуатации. Наряду с характеристиками надежности материалов, такими как сопротивление малоциклового усталости (МЦУ),

скорости роста трещины усталости (СРТУ), статическая и циклическая трещиностойкость, определяющими характеристиками при выборе материалов являются сопротивление коррозионному растрескиванию (КР), коррозия под напряжением, расслаивающая коррозия (РСК) и другие виды коррозии.

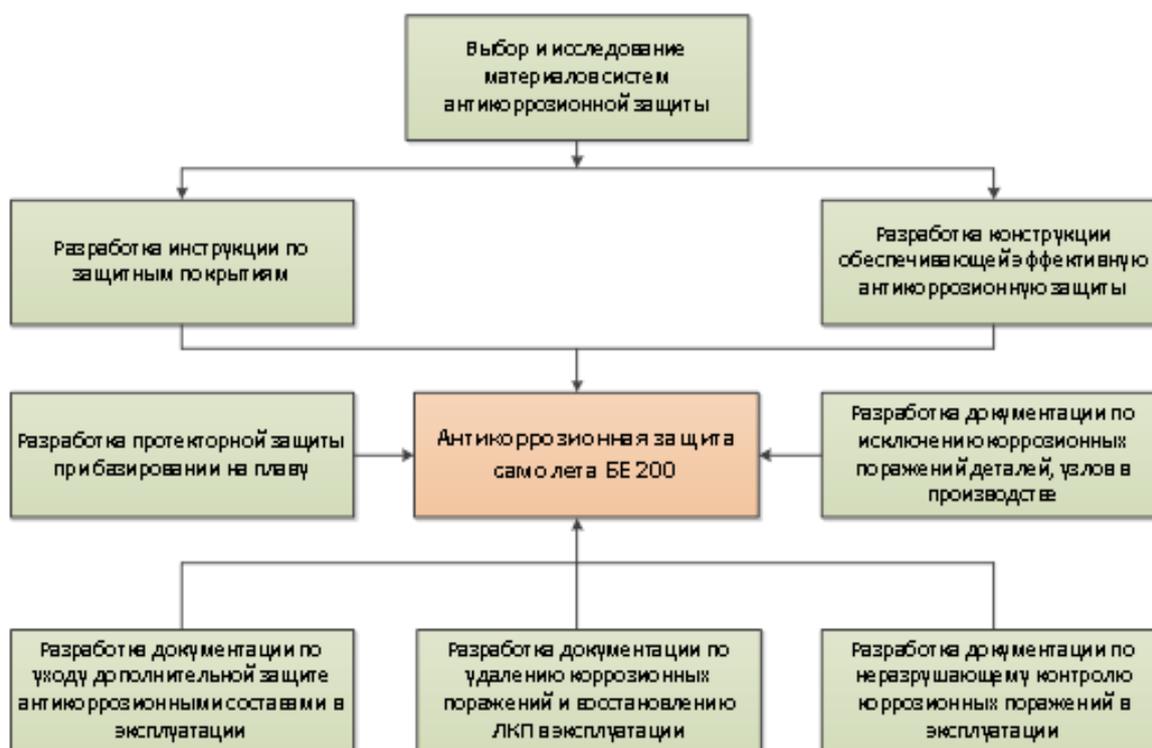


Рис. 1 – Формирование схемы антикоррозионной защиты самолета Бе-200

Одним из направлений обеспечения коррозионной стойкости являются защитные покрытия. Выбор защитных покрытий осуществляется исходя из условий эксплуатации. Для деталей из алюминиевых сплавов анодное оксидирование, для деталей из сталей кадмиевое покрытие с последующим нанесением систем ЛКП на основе эпоксидных грунтовок и эмалей. Детали из титановых сплавов подвергаются импульсному анодированию. Большое внимание уделяется защите от контактной коррозии. Проведен анализ конструкции планера на предмет выявления

зон наиболее подверженных коррозионным поражениям, разработана схема нанесения профилактических составов (рис. 2).

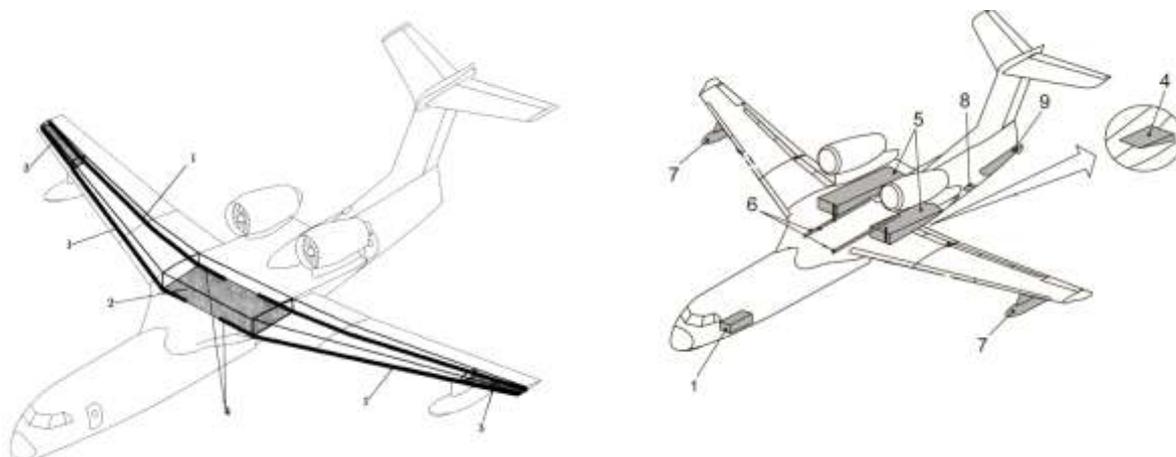


Рис. 2 – Схема нанесения профилактических составов на самолете Бе-200

Исследование выбранных материалов, систем антикоррозионной защиты проводится на образцах и элементах конструкции, как в лабораторных, так и в натуральных условиях. По результатам проведенных испытаний составляется перечень применяемых материалов и систем антикоррозионной защиты, разрабатывается инструкция по защитным покрытиям, стандарт предприятия по применяемым материалам для руководства при рабочем проектировании.

На стадии рабочего проектирования формируется конструктивная приспособленность узлов агрегатов самолета к антикоррозионной защите. Детали проектируются без концентраторов напряжения, резких переходов, острых кромок, карманов. В узлах агрегатах исключены щели, зазоры, застойные зоны, предусматриваются дренажные отверстия для стекания конденсата. В конструкции крыла, лодки, оперения обязательное герметичное исполнение швов. Панели днища лодки, крыла имеющие потайной крепеж анодируются и грунтуются после сверловки, зенковки отверстий и подгонки в стапеле. Данная технология обеспечивает

антикоррозионную защиту, но увеличивает трудоемкость изготовления самолета, а также применение современного автоматического клепального оборудования и механизированной сборки агрегатов, что влечет за собой не только увеличение трудоемкости но и снижение ресурса самолета. В целях решения данной задачи наше предприятие совместно с Обнинским центром порошкового напыления проводит работу по покрытию зенкованных отверстий и мест доработки методом газодинамического напыления порошков.

При длительном базировании самолета на плаву требуется дополнительная защита от коррозии. Для самолета Бе-200 была разработана протекторная защита с стационарными протекторами, которые были закреплены на скулу днища лодки. Проведенные испытания подтвердили эффективность защиты.

Разрабатывается документация по межоперационной защите деталей в производстве от коррозии, проводится аттестация оборудования, технологических процессов в соответствии требованиями отраслевой документации. При сборке исключены монтажные напряжения, исключена подгонка деталей после покрытия.

Уход в эксплуатации осуществляется в соответствии с разработанной инструкцией по эксплуатации учитывающей весь накопленный опыт по мониторингу самолетов-амфибий Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40 с учетом особенностей эксплуатации самолета Бе-200. Периодичность осмотров в соответствии с регламентом технического обслуживания. На самолете Бе-200 были внедрены инструментальные методы контроля коррозионных поражений. Применение инструментальных методов контроля на ряду, визуально - оптическими, позволило выявлять коррозионные поражения на ранней стадии их развития и полноту их удаления.

Объемы неразрушающего контроля самолетов Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40, Бе-200 см. рис. 3.

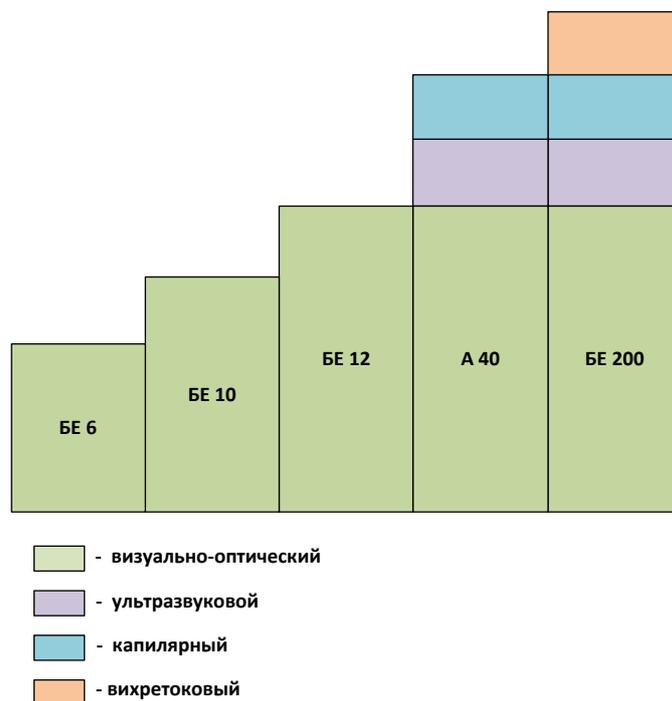


Рис. 3 – Виды неразрушающего контроля в эксплуатации самолетов Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40, Бе-200

В соответствии с данными по эксплуатации и осмотрам самолетов Бе-12, А-40, Бе-200 выявлен рост дефектов в зависимости от срока эксплуатации. Анализируя график приходим к заключению об эффективности антикоррозионной защиты самолета Бе-200 (рис. 4).

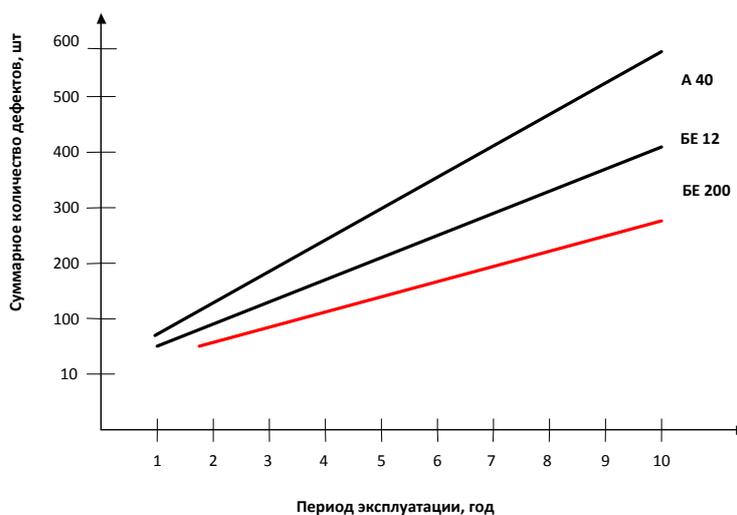


Рис. 4 – Эффективность антикоррозионной защиты самолетов Бе-12, А-40, Бе-200

Из графика видно, что за один и тот же период эксплуатации самое лучшее коррозионное состояние самолета Бе-200, не смотря на наиболее жесткие условия эксплуатации, в сравнении с самолетами Бе-12, А-40; худшее А-40. Основная причина это применение в конструкции самолета А-40 большого количества прессованных полуфабрикатов из материала Д16Т. В конструкции самолета Бе-200 номенклатура прессованных полуфабрикатов из материала Д16Т сокращена (рис. 5). Прессованные полуфабрикаты из материала Д16Т заменены на плакированные листы из сплавов Д16Т, В95пчТ2, 1441, плиты В95пчТ2.

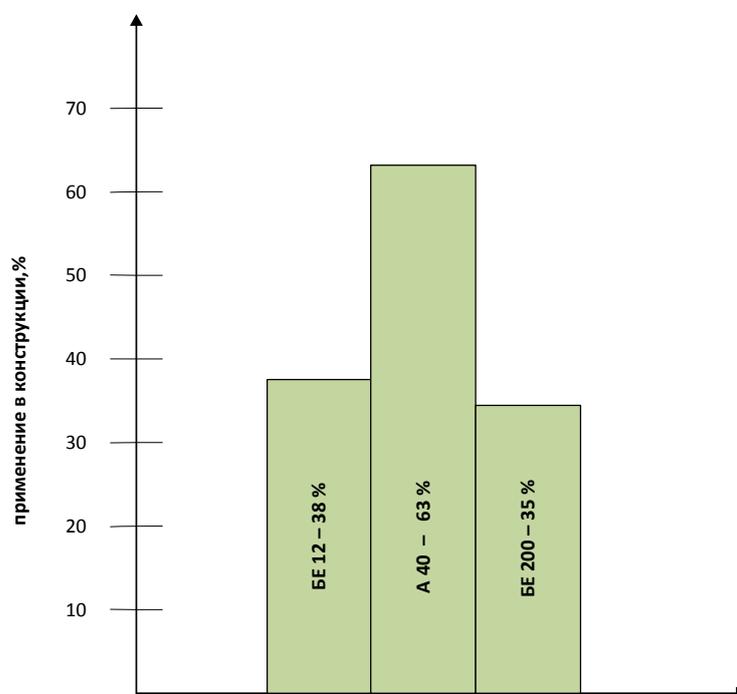


Рис. 5 – Применение прессованных полуфабрикатов в конструкции самолетов Бе-12, А-40, Бе-200

Полученный опыт в результате мониторинга самолетов амфибий Бе-6, Бе-10, Бе-12, А-40 в эксплуатации, выбранных материалов, полуфабрикатов, систем защитных покрытий, методов неразрушающего контроля, позволил разработать эффективную противокоррозионную защиту самолета Бе-200.

Литература

1. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ. – Москва, издательство «Наука», 2013.
2. Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Волков С.В. Анतिकоррозионная защита и коррозионный мониторинг в эксплуатации самолетов – амфибий Бе-12, А-40, Бе-200, Бе-103 /Сб. докладов IX научной конференции по Гидроавиации, «Гидроавиасалон 2012».
3. Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Дюдин В.Б., Будюк Г.Ю. Анализ эффективности антикоррозионной защиты самолетов Бе-200ЧС эксплуатирующихся в МЧС России и ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» /Сб. докладов XI научной конференции по Гидроавиации, «Гидроавиасалон 2016».

УДК 620.193.27 : 669.14.018.293

Коррозионные испытания модельных образцов и габаритных сварных конструкций из судостроительных корпусных сталей в натуральных морских условиях

Орыщенко А.С.¹, д.т.н.; Калинин Г.Ю.¹, д.т.н.;

Фомина О.В.¹, к.т.н., Мушникова С.Ю.¹, к.т.н.

mail@crism.ru

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» -
Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей» (НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»), г. Санкт-Петербург,

Аннотация:

НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» традиционно разрабатывает конструкционные материалы и средства защиты от коррозии для морской техники, где основной коррозионной средой является морская вода. На этапах проектирования, строительства или ремонта морской техники правильный подбор материалов, способов их соединения в конструкции и средств защиты от коррозии возможен только на основе результатов коррозионных испытаний.

Ключевые слова:

металлургия, азотсодержащая сталь, морская вода, коррозионная стойкость.

Введение

Морская вода – основная коррозионная среда, в которой эксплуатируются корпуса кораблей и судов и большинство судовых конструкций. Коррозионная агрессивность морской воды характеризуется высоким содержанием диссоциированных солей, главным образом, хлоридов и сульфатов натрия, магния, кальция и калия, высокой степенью аэрации, хорошей электропроводностью и высокой депассивирующей способностью благодаря большому содержанию хлор-иона.

Наиболее встречающийся вид коррозионного повреждения стальных корпусов судов – общая равномерная или неравномерная коррозия.

Отделение коррозии металлов и сплавов было основано в институте в 1968 году и с тех пор после необходимой реорганизации уже много лет успешно проводятся коррозионные испытания, накоплен большой опыт по определению склонности судостроительных сталей к коррозионному растрескиванию. Современная лаборатория оснащена необходимым испытательным оборудованием для исследования коррозионных и коррозионно-механических характеристик металлов.

Применяемые нами лабораторные методы предусматривают исследования в условиях, имитирующих натурные, при которых можно определить и проконтролировать требуемые параметры. Как правило, они проводятся ускоренно.

При создании новых марок стали в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» обязательным является оценка их склонности к коррозионному растрескиванию. В течение многих десятилетий для этой цели применялись испытания с постоянной нагрузкой или деформацией. Но их проведение требовало большое количество образцов и испытательных машин, при этом длительность испытаний составляла тысячи часов.

Переход на более ускоренные испытания на коррозионное растрескивание позволил получать больший объем информации при значительно меньших затратах металла и времени. В настоящее время в лаборатории коррозии нашего института стойкость сталей к коррозионному растрескиванию определяется двумя методами:

- при постоянной скорости деформации, то есть при медленном одноосном растяжении гладких цилиндрических образцов;
- с применением принципов линейной механики разрушения, то есть при испытаниях образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной методом консольного изгиба при ступенчато возрастающей нагрузке.

Представлены результаты испытаний на коррозионное растрескивание судостроительных сталей в различных коррозионных условиях, в том числе с катодной поляризацией. Из диаграмм растяжения следует, что азотсодержащая сталь отличается высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию в отличие от маломагнитной стали марки 45Г17ЮЗ, подвергающейся коррозионному растрескиванию в отсутствие катодной поляризации и легированной стали 12Х2Н5МФД, склонной к коррозионному растрескиванию, наоборот, в области «перезащиты».

Испытания на питтинговую коррозию чаще всего проводятся электрохимическим и химическим методами. Сущность электрохимического или потенциодинамического метода заключается в анодной поляризации образца от внешнего источника тока с определенной скоростью развертки потенциала с одновременной записью при прямом и обратном ходе анодной кривой, на которых определяются потенциалы питтингообразования и репассивации.

Химический метод заключается в выдержке образцов в растворе хлорного железа, этому методу свойственна простота проведения

эксперимента, отсутствие необходимости в сложном оборудовании (кроме аналитических весов).

Разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» азотсодержащие стали, обладают не только большим уровнем прочностных характеристик, но и более высокой стойкостью к питтинговой коррозии, чем известные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса.

Известно, что движение морской воды может оказать влияние на коррозию металла как фактор, усиливающий подачу кислорода к поверхности металла, и как фактор, способствующий механическому удалению от поверхности металла продуктов коррозии. Соединения разнородных металлов, в том числе сварные соединения сталей, сплавов на основе меди и алюминия могут подвергаться усиленной коррозии в движущемся потоке морской воды. Этот факт необходимо учитывать при эксплуатации трубопроводов и изделий судовой арматуры. В настоящее время был изготовлен так называемый «трубный стенд» для проведения ресурсных испытаний, которые успешно проведены в ГЦКИ в условиях естественной морской среды.

На базе «13 СРЗ ЧФ» проводятся стендовые испытания образцов судостроительных сталей при полном погружении в морскую воду. Проведение натурных морских испытаний показало, что температура и соленость воды Черного моря, наличие биообрастателей, глубина погружения кассет на 4–6 м создают достаточно жесткие условия для проведения стендовых испытаний сталей.

Климатической особенностью полигона ГЦКИ является высокое содержание хлоридов в атмосфере, способствующее ускорению электрохимических процессов коррозии, особенно в сочетании с высокой влажностью воздуха. Применение методики испытаний образцов с обливом морской водой и полным погружении в морскую воду еще более

ускоряет коррозионный процесс, что позволяет сократить время, необходимое для прогнозирования поведения материалов в конструкциях, эксплуатирующихся во всех климатических условиях. Были проведены испытания образцов судостроительных сталей.

В связи с планируемым серьезным обновлением Российского флота, освоением Арктики, активизации навигации по Северному Морскому Пути остро встал вопрос о необходимости проведения испытаний не только образцов, но и моделей, максимально полно отражающих условия эксплуатации, а также отдельных узлов и элементов корпусных конструкций.

Нами были изготовлены несколько модельных сварных конструкций из азотсодержащих сталей, также испытанных в условиях ГЦКИ.

Экспериментальная часть

Испытания модели, изготовленной из азотсодержащей стали, на коррозионную стойкость выполнялись в соответствии с принятой программой испытаний на территории акватории Черного моря в районе города Новороссийск на глубине 15 м.

Через 272 дня после начала испытаний выполнен заключительный подъем модели и ее осмотр. На основании результатов визуального осмотра и испытаний на герметичность установлено, что испытания модели выполнены полностью в соответствии с принятой ранее программой.

По результатам осмотров корпуса модели было установлено, что биологическое обрастание конструкции за время ее испытания носит незначительный характер.

Состояние лакокрасочных покрытий модели в целом удовлетворительное. Участков разрушений и отслоений лакокрасочных и резиновых покрытий не обнаружено, за исключением вздутий лакокрасочного покрытия диаметром до 7 мм в районе крышек горловин.

На неокрашенных поверхностях модели обнаружены следы продуктов коррозии желто-коричневого цвета с подтеками. Наличие указанных следов коррозии было зафиксировано до начала испытаний модели. Предположительная причина их возникновения связана с дробеструйной обработкой корпуса модели чугуном на этапе его изготовления. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость разработки технологии и выбора материала для выполнения дробеструйной очистки азотсодержащей стали, которые будут использоваться в дальнейшем при строительстве конструкций из данного материала.

По результатам выполненных испытаний на герметичность и визуального осмотра внутреннего объема модели установлено, что корпус на протяжении всего периода выполнения испытаний оставался герметичен. Его внутренние поверхности сухие и не имеют следов коррозионного поражения.

В целом по результатам испытаний модели можно сделать вывод об отсутствии каких-либо коррозионных повреждений как основного материала азотсодержащей стали, так и сварных швов конструкции. Для выполнения в дальнейшем дробеструйной очистки металлопроката и конструкций из азотсодержащей стали требуется разработка технологии и выбор материала, которые при воздействии коррозионной среды не будут обуславливать появление продуктов коррозии на обработанных поверхностях.

Выводы

В течение последних лет на предприятиях судостроения разработаны принципиально новые материалы и покрытия, конструкции деталей и узлов, в то же время информация об их коррозионной стойкости в морской воде отсутствует.

Таким образом, разработка и изготовление крупномасштабных модельных образцов нагруженных сварных узлов, имитирующих элементы реальных корпусных конструкций из высокопрочных судостроительных сталей объектов надводной и глубоководной морской техники, для стендовых коррозионных испытаний в естественной морской воде является важной задачей.

Она включает также:

– разработку методик расчета напряжений, создаваемых в модельных образцах при изготовлении корпусных конструкций морской техники (при сварке, штамповке, гибке и так далее).

– разработку системы электрохимического воздействия на модельные образцы корпусных конструкций, позволяющей воспроизводить условия, способные вызвать ускоренное разрушение материалов в морской воде (в области «перезащиты» при использовании протекторов).

– изготовление модельных образцов нагруженных сварных узлов из высокопрочных корпусных судостроительных сталей с применением технологий, принятых в судостроении и перспективных для использования при строительстве объектов морской техники.

– проведение предварительных испытаний модельных образцов из корпусных судостроительных сталей различного уровня прочности в естественной морской воде.

Мы открыты для сотрудничества и решения вопросов коррозионных испытаний крупномасштабных модельных образцов в различных климатических условиях.

УДК 620.193.21

Питтинговая коррозия деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях

Курс М.Г.¹, к.т.н.; Лаптев А.Б.¹, д.т.н.; Гончаров А.А.¹

KursMG@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Аннотация:

Представлены результаты исследования глубины и характера распространения питтинговой коррозии алюминиевых сплавов восьми систем легирования после натурно-ускоренных испытаний на стенде с автоматическим обливом морской водой в условиях ГЦКИ ВИАМ.

Ключевые слова:

алюминиевые сплавы, питтинговая коррозия, натурно-ускоренные испытания.

Введение

Исследование закономерностей процессов коррозионного разрушения призвано для понимания природы механизмов коррозии металлических материалов в условиях повышенной коррозионной агрессивности, необходимого для разработки превентивных мер по ее устранению и относится к приоритетным направлениям развития материалов и технологии [1, 2].

Изучением питтинговой коррозии занимаются многие отечественные и зарубежные научные школы. В источнике [3] приведен анализ литературы за несколько десятилетий, посвященной изучению процессов зарождения и развития питтинга. Процесс формирования и развития питтингов зависит от большого числа факторов, что делает этот процесс сложным для описания. Исследование межкристаллитной коррозии алюминиевых сплавов обычно неразрывно связано с изучением питтинговой коррозии, т.к. эти виды коррозионного разрушения имеют непосредственную взаимосвязь [4]. Вызывая неоднородность рельефа поверхности, питтинговая коррозия способствует увеличению степени удержания хлоридов на поверхности металла, что оказывает непосредственное влияние на процесс коррозионного разрушения.

Основное влияние на зарождение питтинговой коррозии оказывают физические и химические свойства пассивной пленки, образующейся на алюминиевых сплавах. Однако в процессе роста питтинга эти факторы играют второстепенную роль. Благоприятными условиями для стабильного роста питтинга является наличие хлоридов высокой концентрации с низким рН в устье очага, когда репассивация затрудняется [5].

На сегодняшний день ГОСТ 9.908-85 [6] является единственным российским нормативным документом, регламентирующим порядок оценки склонности материалов к питтинговой коррозии. Зарубежный стандарт ASTM G46 [7] содержит наиболее полное описание методов оценки питтинговой коррозии, включающее металлографический метод, а также методы неразрушающего контроля: рентгеновский, электромагнитный, ультразвуковой, акустический, капиллярный и др. Стандартом приведены типичные изображения вариантов распространения питтинга на поверхности металла (Рисунок 1).

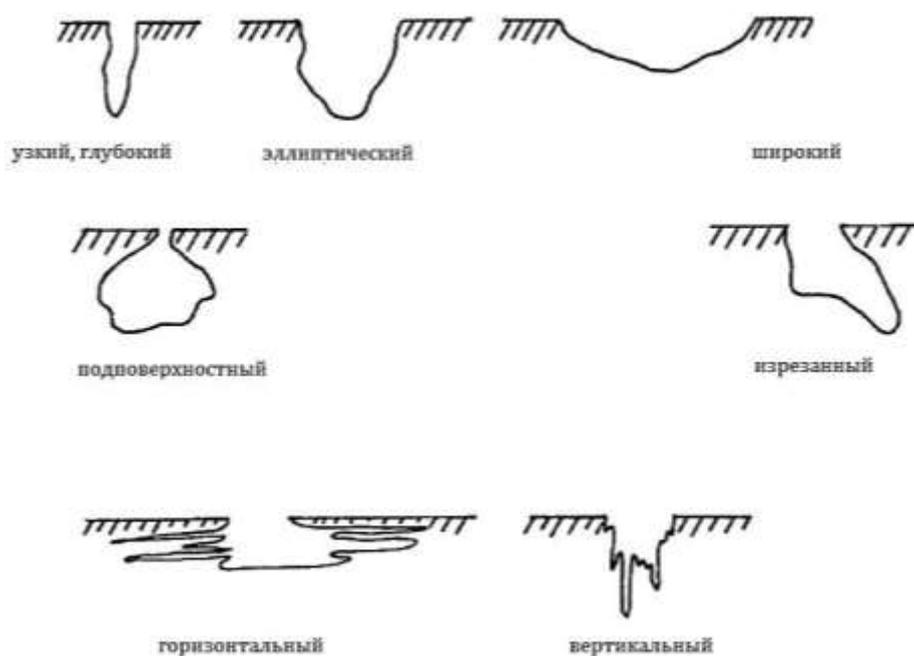


Рис. 1 – Варианты распространения питтингов по сечению образца [7]

На сегодняшний день наиболее перспективным методом определения глубины питтинга является применение лазерной сканирующей микроскопии, которая позволяет проводить измерения неразрушающим методом и может быть практически полностью автоматизирована с минимальным привлечением оператора. К достоинствам характеристики измерения питтинговой коррозии можно отнести отсутствие необходимости специальной подготовки образцов (используются образцы с удаленными продуктами коррозии), а также высокая чувствительность показателя к изменению коррозионного состояния материала. Недостатком метода является невозможность обнаружения областей горизонтального распространения питтингов при подповерхностном, изрезанном и горизонтальном распространении (Рисунок 1).

Согласно источника [5], можно выделить четыре основных этапа развития питтинговой коррозии:

- 1) процессы, происходящие на пассивной пленке, на границе пассивной пленки и раствора электролита;
- 2) процессы, происходящие в пассивной пленке, когда видимые изменения нельзя обнаружить на микроскопическом уровне;
- 3) образование так называемых метастабильных ям, которые инициируются и растут в течение короткого периода времени ниже критического потенциала питтинговой коррозии, а затем повторно пассивируют (промежуточный этап);
- 4) стабильный рост питтинга, происходящий выше определенного потенциала, называемым критическим потенциалом питтинга.

Также авторами данной работы сделан вывод о том, что нет порога концентрации хлорида, ниже которого не произойдет развития питтинговой коррозии. Аналогичным образом, наличие ингибитора задержит, но не предотвратит развитие питтинговой коррозии.

Настоящая работа является продолжением исследований коррозионного разрушения алюминиевых сплавов восьми систем легирования, освещенных ранее в работе [8]: 1424T1 системы Al-Mg-Li, B-1469T1 системы Al-Cu-Li-Mg, B-1461T1 системы Al-Cu-Li, 1441T1 системы Al-Li-Mg-Si, B-1341T1 системы Al-Mg-Si, 1370T1 системы Al-Mg-Si-Cu, 1913T3 Al-Mg-Zn, B96ц3пчT12 системы Al-Zn-Mg-Cu и посвящена более глубокому исследованию питтинговой коррозии.

Известно, что промышленные конструкционные алюминиевые сплавы в основном являются сильнолегированными и имеют сложный фазовый состав. Согласно диаграмме состояний для сплавов рассматриваемых систем легирования характерен следующий фазовый состав:

– 1424: δ' (Al_3Li) и $\text{S}_1(\text{Al}_2\text{MgLi})$;

- В-1469: θ -фаза Al_2Cu , T_1 -фаза Al_2CuLi и T_2 -фаза $Al_6Cu(Li,Mg)_3$;
- 1370: β -фаза (Mg_2Si), Q-фаза ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$);
- 1163: S(Al_2CuMg) фаза, θ -фаза Al_2Cu ;
- 1913: η (Mg_2Zn), θ -фаза Al_2Cu .

Все исследуемые в данной статье Al-сплавы находятся в окончательно состаренном состоянии, в основном имеют частично рекристаллизованную структуру, состоящую из зерен, разделенных высокоугловыми границами. Для состаренного состояния характерно выделение дисперсной упрочняющей фазы, как правило, выделяющейся гомогенно внутри зерна. Однако, в ходе старения возможно образование крупных частиц равновесной фазы на границах зерна. Разница химического состава выделения и Al-матрицы и, следовательно, разный потенциал может приводить к развитию коррозии.

1. Шероховатость поверхности как фактор коррозионной восприимчивости материала

Инициация и развитие питтинга во многом определяется состоянием исходной поверхности образца перед испытаниями. Под шероховатостью понимается совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами в пределах стандартного участка [9].

Авторами многих работ отмечается влияние шероховатости на коррозионную восприимчивость поверхности металлических образцов. Микронеровности, в частности глубокие впадины с малыми радиусами закругления дна, увеличивают неоднородность поверхности и приближают момент первых коррозионных разрушений [10].

ГОСТ 9.913, 9.904, 9.021 (испытания на общую, расслаивающую и межкристаллитную коррозию) установлены следующие требования к образцам для испытаний: шероховатость обработанной поверхности R_a по ГОСТ 2789 должна быть не более 2,5 мкм, необработанной поверхности – соответствовать требованиям стандартов и др. НТД на полуфабрикат и детали. В то же время в ГОСТ 9.905 и 9.909, регламентирующих методы

климатических коррозионных испытаний, вовсе отсутствуют требования по шероховатости исходной поверхности образцов.

В работе [11] приведены результаты испытаний по оценке влияния режимов травления на качество поверхности образцов алюминиевого сплава. С увеличением температуры раствора (NaOH) повышается скорость травления, но при этом резко ухудшается качество поверхности, – Ra 6 мкм и более. Предполагается, что процесс растворения алюминиевых сплавов с повышенным содержанием меди идет по электрохимическому механизму, т.е. на поверхности заготовки образуются микрокатоды и микроаноды. За счет неравномерности снятия металла образуются выступы (катодная поверхность) и впадины (анодная поверхность), что приводит к ухудшению качества поверхности, особенно при повышенных температурах раствора (более 50°C).

В ГОСТ 2789-73 [12] приведены 6 параметров шероховатости, среди которых наиболее часто используемыми являются R_a – среднеарифметическое отклонение профиля и R_z – высота неровностей профиля по 10-и точкам.

Для исследования влияния шероховатости поверхности на коррозионную восприимчивость были проведены натурно-ускоренные испытания образцов алюминиевого сплава 1163Т1 (Таблица 1). Изменение шероховатости поверхности проводилось для образцов, подверженных дополнительному травлению после снятия плакировки. Для испытаний были использованы образцы размером 50×50 мм в количестве 3 образцов на точку. Экспозиция образцов проводилась в условиях умеренно теплого климата приморской зоны, под навесом, с ежедневным нанесением раствора морской соли в концентрации 5 г/л в течение 1 месяца. Оценка шероховатости поверхности исходных образцов проводилась на микроскопе Olympus LEXT при увеличении ×500 в режиме измерения по площади; усреднение проводилось по 9 точкам поверхности.

Как видно из таблицы, даже небольшое увеличение шероховатости поверхности способствует большему коррозионному разрушению

образцов алюминиевых сплавов, что говорит о важности проведения тщательного входного контроля перед постановкой образцов на испытания.

Таблица 1

Исследование влияния времени травления на коррозионную восприимчивость поверхности образцов сплава 1163Т

Время травления, мин.	R _a , мкм	R _z , мкм	V _{корр.} , г/м ² сут	Глубина МКК, мм	Глубина питтинга, мкм
Снятие лакировки (12 мин.)	0,63-0,8	8,0-10,0	0,0917	0,18	58/75*
Снятие лакировки + 3 мин.	0,8	10,0	0,1013	0,21	62/78
Снятие лакировки + 6 мин.	0,8-1,0	10,0	0,1146	0,25	74/93

*А/Б – среднее/максимальное значение

2. Сравнение методов оценки склонности сплавов к питтинговой коррозии

Так как ГОСТ 9.908-85 и ASTM-G46 предусматривают возможность оценки склонности сплавов к питтинговой коррозии различными методами, определенный интерес возникает в сравнении точности этих методов.

Для сравнения различных методов определения глубины питтинга были проведены испытания неразрушающим методом контроля (лазерной сканирующей микроскопией) на микроскопе Olympus LEXT и на металлографическом микроскопе Olympus GX51 с изготовлением металлографического шлифа (Рисунок 2). Результаты сравнения методов представлены в Таблице 2.

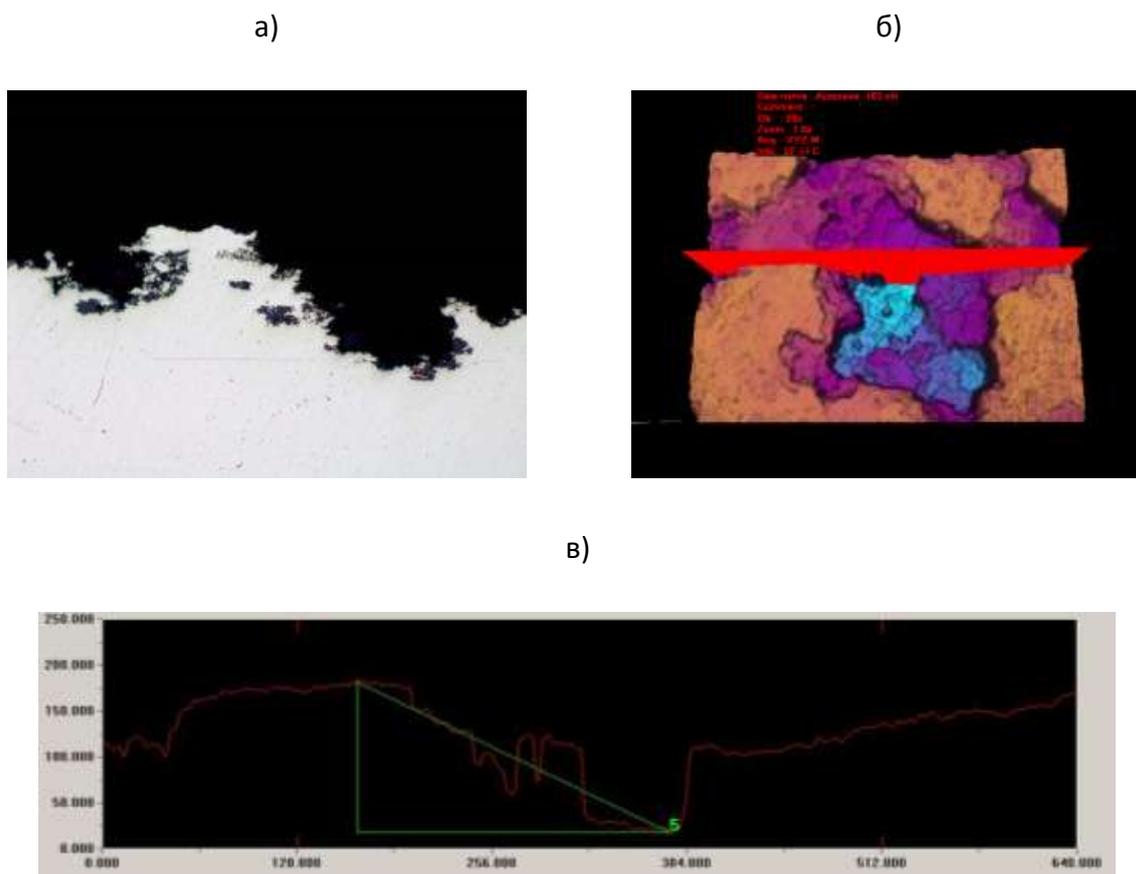


Рис. 2 – Определение глубины питтинговой коррозии сплава 1913Т3 металлографическим методом с изготовлением микрошлифа (а), и с помощью лазерной сканирующей микроскопии (б, в)

Таблица 2

Сравнение результатов измерения глубины питтинга образцов алюминиевых сплавов неразрушающим методом контроля и металлографическим способом.

Сплав	Условия испытаний	Глубина питтинга, измеренная на металлографическом шлифе на микроскопе Olympus GX51, мкм	Глубина питтинга, измеренная неразрушающим способом на микроскопе Olympus LEXT, мкм
После 2х лет испытаний			
В-1341Т1	Облив 1 г/л	30	140
В-1469Т1	Облив 10 г/л	100	198
В-1461Т1	Облив 10 г/л	30	176
1441Т1	Без облива	25	35
1370Т1	Облив 10 г/л	150	322
После 1 года испытаний			
В96цЗпчТ12	Облив 5 г/л	28	187
1913Т3	Без облива	35	160
1913Т3	Облив 10 г/л	100	235

Как видно из таблицы, способ измерения глубины питтинга в значительной степени сказывается на получаемых результатах. ASTM G46 предусматривает большое количество методов оценки глубины питтинга и при этом оговаривает, что все они не обладают достаточной точностью измерения и не позволяют оценить глубину питтингов малых размеров, а также не позволяют отличить питтинги от других поверхностных дефектов. В части металлографического метода измерения в стандарте говорится о главной причине отсутствия необходимой точности метода – крайне сложно изготовить шлиф в максимальной точке впадины.

Проведение неразрушающих исследований на лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT позволяет оценить глубину питтинга с высокой точностью, т.к. проводится сканирование всей впадины с построением профиля поверхности в точке наибольшей глубины питтинга.

3. Исследование питтинговой коррозии алюминиевых сплавов после коррозионных испытаний

Деструкция поверхностного слоя алюминиевых сплавов начинается с развития питтинговой коррозии, скорость развития которой обуславливается составом среды в устье питтинга, при этом образование плотных кальцинированных слоев продуктов коррозии способствует сохранению среды с $\text{pH} \sim 7,5 \div 8$ в устье очага, – таким образом, мы можем видеть сохранение тенденции роста питтинга и после 4 лет экспозиции.

Ранее в работе [8] были приведены данные о том, что большая подверженность исследованных сплавов питтинговой коррозии обуславливает большее удержание хлоридов на поверхности образца.

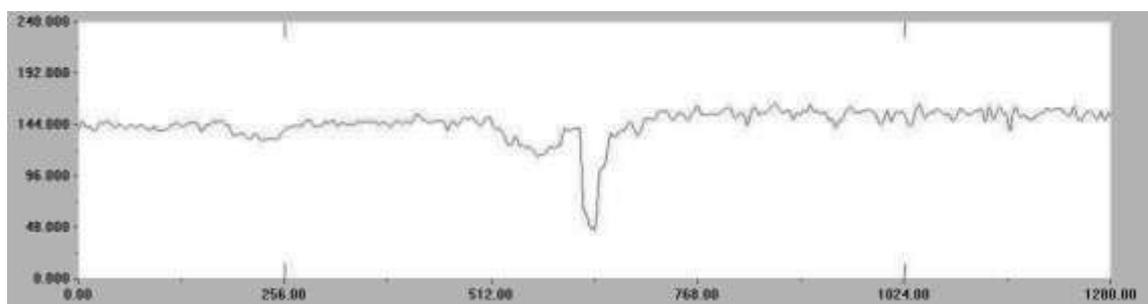
3.1 Анализ профиля поверхности образцов после коррозионных испытаний

По характеру профиля поверхности образцов после коррозионных испытаний по результатам обработки изображений исследованные

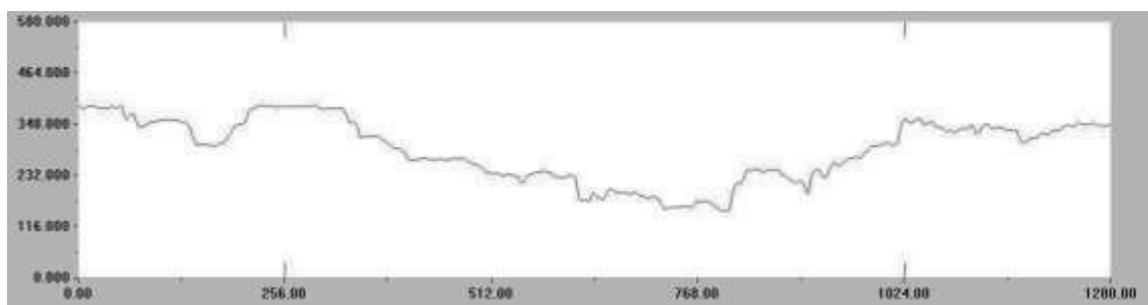
образцы можно разделить на 3 преобладающих вида в соответствии с типами, приведенными в ASTM G46 (Рисунок 1): узкий глубокий (1371Т1), широкий (В-1341Т1, 1441Т1, В96ц3пчТ12, 1913Т3) и эллиптический (В-1469Т1, В-1461Т1, 1424Т1) (Рисунок 3).

Отличие характера распространения питтинга для сплавов В-1341Т1 и 1441Т1 от В96ц3пчТ12 и 1913Т3 в большей глубине питтинга для последних по сравнению с первыми при равной ширине устья.

а)



б)



в)

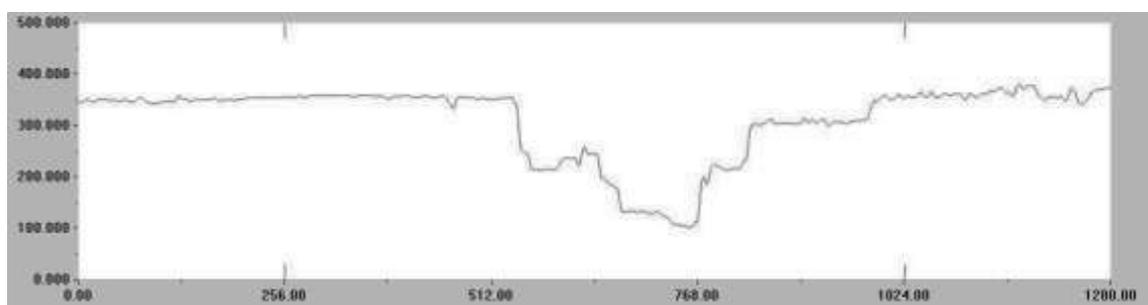


Рис. 3 – Изображения типичных профилей поверхности образцов алюминиевых сплавов после коррозионных испытаний, полученных при 3D-сканировании поверхности: а – узкий глубокий, б – широкий, в – эллиптический

В целом же охарактеризовать строгую принадлежность того или иного сплава к определенному типу распространения питтинга достаточно сложно, так как изрезанность рельефа поверхности чаще всего носит смешанный характер (Рисунок 4), при котором можно выявить только наиболее характерную форму распространения.

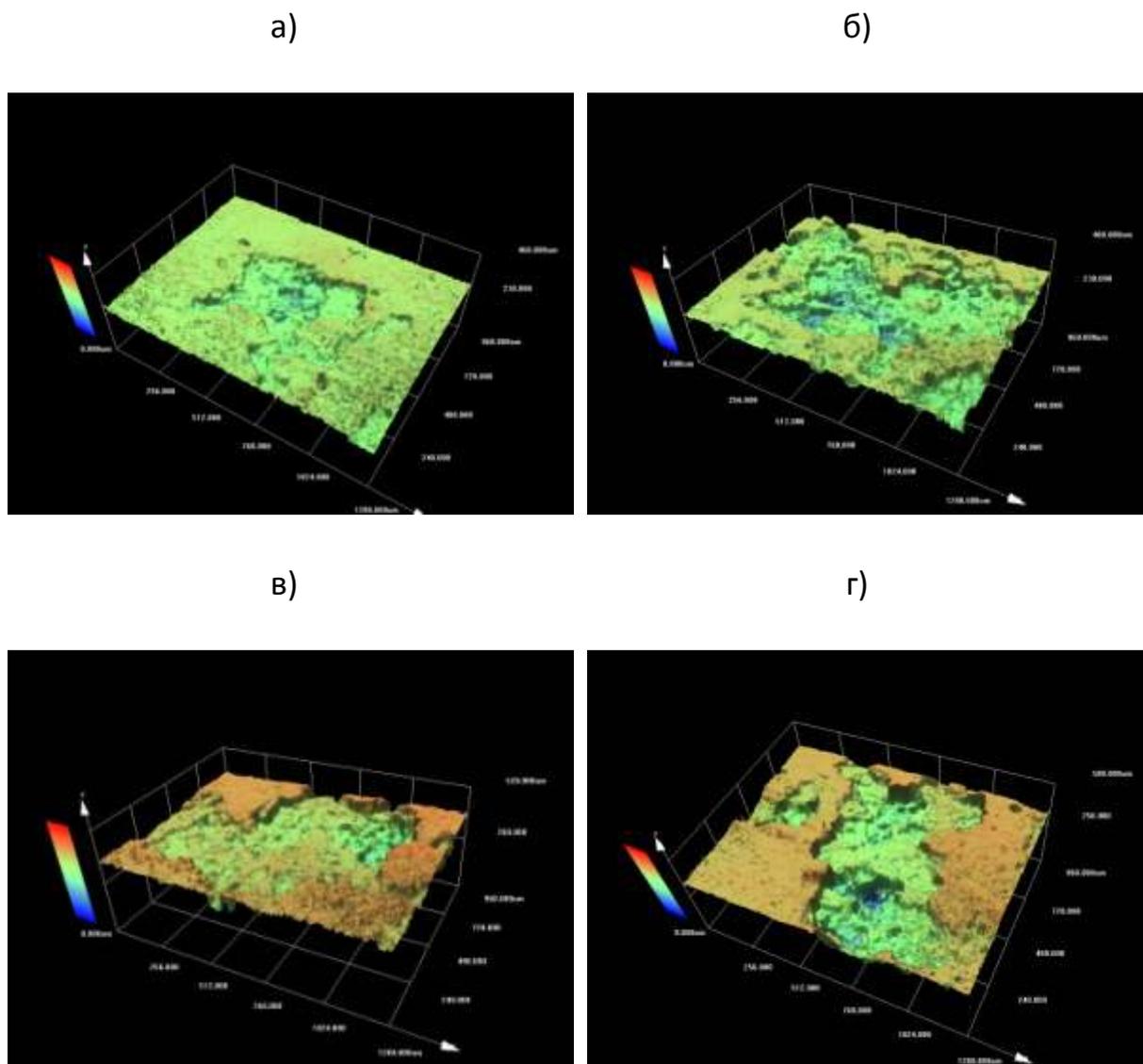


Рис. 4 – Питтинговая коррозия сплава 1913Т3 после натурно-ускоренных испытаний:

а – 6 мес., б – 1 г., в – 2 г., г – 4 г.

3.2 Исследование кинетики роста глубины питтинговой коррозии

На питтинговую коррозию алюминиевых сплавов значительное влияние оказывают структурные неоднородности и несовершенства кристаллической структуры. Не вызывает сомнений возможность растворения анодных составляющих сплава. Скорость питтинговой коррозии замедляется во времени, что в основном это обусловлено образованием продуктов коррозии, которые препятствуют взаимодействию участков металла, подвергнутого коррозии с агрессивной средой [13]. В сравнении с результатами испытаний на открытой площадке, при испытаниях с обливом за счет частого нанесения раствора не происходит пересыхания электролита в устье очага с образованием защитного экрана продуктов коррозии и рост питтинга, хоть и тормозится с течением времени, но полностью не стабилизируется.

Согласно ГОСТ 9.908, при определении глубины питтинга выбирают максимальное из полученных значений по образцу. Определение максимальной глубины питтинга проводят в очагах максимального диаметра.

На примере двух сплавов, характеризующихся различной степенью подверженности питтинговой коррозии, – 1913Т3 и 1370Т1, – проведено определение разброса получаемых данных. Как видно из Рисунка 5, среднеквадратическое отклонение (σ) тем выше, чем больше склонность сплава к питтинговой коррозии. Кроме того, разбросы получаемых значений возрастают с увеличением продолжительности испытаний, что также связано с ростом степени неоднородности поверхности.

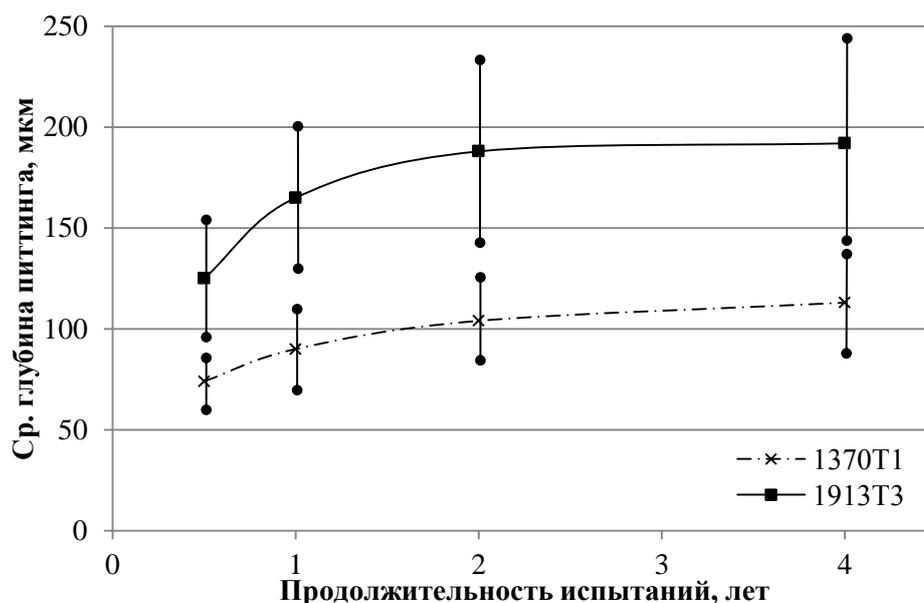


Рис. 5 – Увеличение σ для измеренных величин глубины питтинговой коррозии сплавов 1913Т3 и 1370Т1 относительно средней после 4 лет натурно-ускоренных испытаний

В отличие от глубины МКК, для всех сплавов наблюдается рост глубины питтинга в течение всего периода испытаний. Скорость роста на втором году испытаний становится меньше по сравнению с первым годом практически для всех сплавов. К 4 годам испытаний скорость роста питтинга уменьшается \sim в 2 раза по сравнению с 2мя годами.

Ввиду торможения роста МКК по сравнению с более стабильным ростом питтинга, после 2х лет испытаний преобладающая склонность сплавов В-1341Т1 и В-1469Т1 к межкристаллитной коррозии меняется на преобладающую склонность к питтинговой коррозии (на Рисунке 6 буквами «П» и «М» обозначена преобладающая склонность сплавов к питтинговой и межкристаллитной коррозии соответственно). Как видно из Рисунка 6, наибольшее влияние на снижение прочностных свойств оказывает степень подверженности сплавов МКК (на рисунке сплавы расположены в порядке увеличения прочностных потерь после натурно-ускоренных испытаний (σ_B и $\sigma_{0,2}$)).

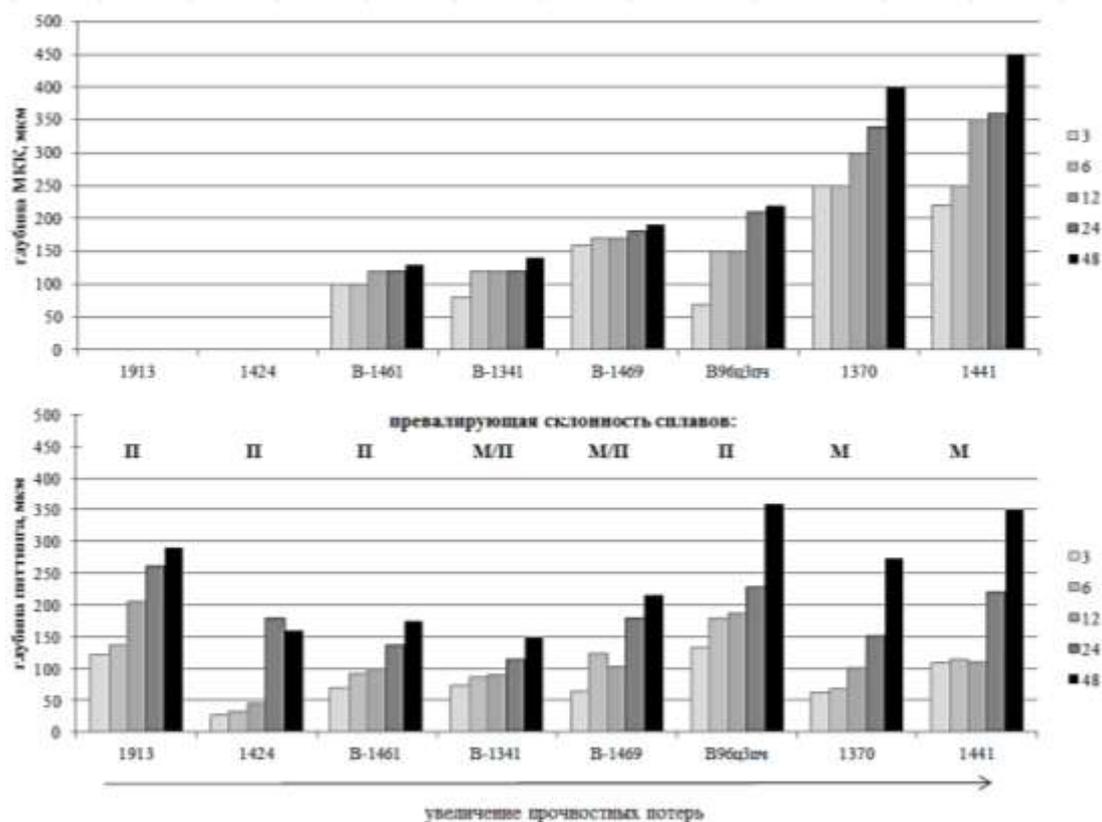


Рис. 6 – Глубина питтинговой коррозии в сопоставлении с глубиной МКК алюминиевых сплавов после 4 лет натурно-ускоренных испытаний

Несмотря на то, что показатель питтинговой коррозии не является определяющим фактором, обуславливающим снижение прочностных свойств, данный показатель следует рассматривать как один из основных параметров, наряду с межкристаллитной и расслаивающей коррозией, характеризующих общее коррозионное поведение материалов. В методике расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения [14] интегральный показатель питтинговой коррозии рассчитывается как совокупность глубины питтинга, а также площади и максимального диаметра коррозионных поражений по образцу (параметр глубины принят как наиболее значимый). В работе [15] также показано, что по результатам натурно-ускоренных испытаний возможно прогнозирование изменения глубины питтинговой коррозии алюминиевых сплавов на основе анализа кинетики роста питтинга, подчиняющейся степенному закону.

Выводы

1. Показатель питтинговой коррозии, наряду с межкристаллитной и расслаивающей коррозией, характеризует степень подверженности сплавов локальному коррозионному разрушению и необходим для учета в интегральной характеристике коррозионной стойкости материалов.

2. При сопоставлении существующих методик оценки питтинговой коррозии показано, что наиболее перспективным является применение лазерной сканирующей микроскопии против стандартно применяемого металлографического метода, рекомендуемого отечественным и зарубежными стандартами.

3. По результатам исследования склонности алюминиевых сплавов к питтинговой коррозии после натурно-ускоренных испытаний установлено, что сохранение тенденции роста глубины питтинга характерно для всех исследованных сплавов, – таким образом, с учетом торможения роста межкристаллитной коррозии, превалирующая склонность к межкристаллитной коррозии для некоторых сплавов после 2 лет испытаний сменяется на превалирующую склонность к питтинговой коррозии. Среди исследованных сплавов данная закономерность выявлена для сплавов В-1341Т1 и В-1469Т1.

4. Показано, что разбросы значений глубины питтинга растут с увеличением степени изрезанности поверхности: разбросы тем выше, чем больше склонность сплава к питтинговой коррозии и тем выше, чем больше срок испытаний.

5. При исследовании влияния продолжительности травления, используемого в качестве стандартной операции при подготовке поверхности образцов алюминиевых сплавов перед испытаниями, установлено, что увеличение шероховатости исходной поверхности приводит к значительной интенсификации коррозионных процессов на начальной стадии.

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. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 157–167.
3. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials // Corrosion Science, No. 90 (2015), P. 5–22
4. Knight S.P., Salsgaras M., Trueman A.R. The study of intergranular corrosion in aircraft aluminum alloys using X-ray tomography // Corrosion science. 2011. № 53. 727–734.
5. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum // Corrosion Science. 41 (1999) 1743–1767
6. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.
7. ASTM G46 - 94(2013). Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion.
8. 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.
9. Скрипченко Ю.С. Шероховатость обработанной поверхности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12-2. С. 99–100.

10. Алиев А. А., Булгаков В. П., Приходько Б. С. Качество поверхности и свойства деталей машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 8–12.

11. Вильнер А.Ю. Физико-химическая обработка крупногабаритных деталей летательных аппаратов // Наука и современность. 2010. № 2-2. С. 309–314.

12. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

13. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. 2-е издание. М.: Металлургия, 1986. 368 с.

14. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3. С. 24-32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.

15. Курс М.Г., Кутырев А.Е. Применение интегрального коэффициента коррозионного разрушения для прогнозирования изменения прочностных свойств деформируемых алюминиевых сплавов // Сб. докл. всеросс. молодеж. науч.-технич. конф. «Современное материаловедение: традиции отечественных научных школ и инновационный подход» М.: ФГУП «ВИАМ», 2017. С. 132–142.

УДК 620.193.21

Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка концепции их комплексных коррозионных испытаний

Кутырев А.Е.¹, к.х.н.; Чесноков Д.В.¹

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Аннотация:

Был рассмотрен существующий уровень проведения комплексных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов, применяемых в авиации.

Комплекс методик коррозионных испытаний позволяет получать данные по сравнительной коррозионной стойкости состояние по проведению испытаний алюминиевых сплавов проведен анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов пониженной коррозионной стойкости с целью определения возможности прогнозирования их коррозии.

Ключевые слова:

алюминиевые сплавы, коррозионные испытания.

Введение

Алюминиевые сплавы средней и высокой прочности, применяемые в авиации, согласно Синявскому [1], относятся к сплавам с пониженной коррозионной стойкости. Для защиты их от атмосферной коррозии применяют различные системы покрытий, как правило, состоящие из оксидного слоя, нанесенного либо анодированием, либо химическим

оксидированием, и слоев лакокрасочного покрытия [2]. Однако как в процессе сборки изделия авиационной техники (АТ), так и в процессе эксплуатации возможно повреждение покрытия, приводящее к развитию коррозии.

Процесс коррозии алюминиевых сплавов в отличие от, к примеру, углеродистой стали достаточно сложен и включает в себя протекание питтинговой (ПК), межкристаллитной коррозии (МКК) и расслаивающей коррозии (РСК), в зависимости от склонности сплавов к МКК и/или РСК, которая определяется не только составом сплава и режимом термообработки, но и также от вида и размера полуфабриката [1].

Поскольку алюминиевые сплавы пониженной коррозионной стойкости вследствие их хороших прочностных свойств, являются основным материалом при изготовлении изделий АТ [3], особенно это касается конструктивно-важных элементов самолета, то целостность конструкции планера самолета в основном определяется сохраняемостью прочностных свойств алюминиевых сплавов. При этом из анализа различных дефектов, выявляемых при эксплуатации самолета [4], более 80% из них относятся к коррозионным дефектам. Поскольку прочностные свойства алюминиевых сплавов сильно зависят от наличия коррозионных поражений, особенно от расслаивающего или межкристаллитного характера, то контроль над протеканием коррозии является одной из важнейших задач для обеспечения безопасной эксплуатации воздушного судна (ВС). Это отмечается многими специалистами, работающими в данной области [4–8].

Развитие методов прогнозирования атмосферной коррозии металлов в основном коснулось металлов, корродирующих по типу общей коррозии, таких как медь, углеродистая сталь и т.д. На основании механизма атмосферной коррозии, разработанному Михайловским с сотрудниками [9], был введен в действие ГОСТ 9.040 [10], позволяющий по

определенным экспериментально зависимостям скорости коррозии от ряда параметров атмосферы, таких как влажность, температура, концентрация диоксида серы и др., рассчитать предполагаемую величину коррозионных потерь в том или ином районе СССР. Также были разработаны функции доза-ответ (ФДО), позволяющие вычислить величину первогодových потерь углеродистой стали, меди, цинка и алюминия в зависимости от параметров атмосферы [11], а также сделать долгосрочный прогноз [12]. При этом следует заметить, что для алюминия погрешность при применении ФДО – наибольшая. К тому же коррозионное поведение чистого алюминия, относящегося к сплавам повышенной коррозионной стойкости [1], отличается от коррозионного поведения основных авиационных алюминиевых сплавов.

С учетом этого можно заключить, что прогнозирование атмосферной коррозии алюминиевых сплавов достаточно сложный и неизученный вопрос. Более того, на конференции EUROCORR 2014 члены рабочей группы «Коррозия в авиации и космических аппаратов» выразили мнение, что еще даже не накоплен объем экспериментальных исследований, достаточных для достоверного моделирования развития коррозионных поражений на алюминиевых сплавах.

В отсутствие разработанных методов прогнозирования коррозии, в авиации для оценки вероятности возникновения коррозионных повреждений в изделиях АТ используют статистический метод [7]. Данный подход развивается в работах МГТУ ГА [13, 14]. Разработан и введен в действие «Паспорт коррозионного состояния ВС», отражающий количество и качество коррозионных дефектов. Прогноз средних и максимальных значений параметров коррозии на ВС выполняется по результатам мониторинга коррозионного состояния парка ВС. Недостатки такого подхода:

- для новых разработанных изделий АТ такой подход не применим;

- результатом данного подхода является постановка самолета на особый контроль по коррозионному состоянию;
- отсутствует разделение ВС в зависимости от мест базирования.

Существует потребность в разработке комплексной программы по оценке кинетики коррозионных повреждений и прогнозированию скорости их роста для определения методов, объемов и сроков ремонта и профилактики, обеспечивающих предупреждение появления дефектов. Данная программа должна содержать некую математическую модель коррозии алюминиевых сплавов, представляющую собой зависимость его показателей коррозии от времени и основных параметров атмосферы (метеорологических и аэрохимических). Безусловно, модель должна определяться по результатам ускоренных и натурных испытаний, то есть должна существовать определенная программа проведения комплексных коррозионных испытаний, позволяющая полностью описать коррозионное поведение алюминиевого сплава в атмосфере.

Существующий уровень коррозионных испытаний алюминиевых сплавов подразумевает применение ряда методов:

1. Ускоренные испытания на склонность к локальным видам коррозии:
 - 1.1 Испытания на склонность к МКК – ГОСТ 9.021;
 - 1.2 Испытания на склонность к РСК – ГОСТ 9.904;
 - 1.3 Испытания на склонность к КРН – ГОСТ 9.019;
2. Ускоренные коррозионные испытания для получения сравнительных данных по коррозионной стойкости (общая коррозионную стойкость) – ГОСТ 9.913;
3. Натурные испытания – ГОСТ 9.909 (краткосрочные – согласно стандарту продолжительность испытаний образцов металлов и сплавов – не менее 3 лет).

Указанные методы позволяют получать данные по сравнительной коррозионной стойкости алюминиевых сплавов

В данной работе на основе анализа данных по натурным испытаниям предпринята попытка разработать модельные представления атмосферной коррозии алюминиевых сплавов, предложена концепция проведения их ККИ, а также приведены необходимые для разработки методики ускоренных коррозионных испытаний. В работе рассмотрены данные по натурным испытаниям алюминиевых сплавов, проведенные как в СССР [15] и РФ [16,17], так и за рубежом [18–21]. Однако основной упор сделан на испытания, которые проводились в ГЦКИ им. Г. Акимова, а также в г. Батуми, поскольку данные было легко оцифровать. Кроме того данные по натурным испытаниям в ГЦКИ получены с использованием наибольшего количества методик исследований коррозионных поражений.

Разработка математической модели коррозии алюминиевых сплавов

Анализ проблемы разработки математической модели коррозии алюминиевых сплавов приводит к необходимости решения нескольких задач:

1. Разработка методологии анализа коррозионных поражений алюминиевых сплавов;
2. Разработка методологии интерполяции результатов натурных испытаний алюминиевых сплавов с целью определения годовых коррозионных потерь в предполагаемых местах базирования изделий АТ;
3. Разработка методологии прогнозирования коррозионных потерь алюминиевых сплавов на основе ускоренных и краткосрочных натурных испытаний;
4. Разработка методологии определения коррозионной агрессивности атмосферы в отношении алюминиевых сплавов в местах базирования изделий АТ, в том числе и внутри изделия.

Последняя задача уже выходит за пределы рассмотрения данной статьи и относится непосредственно к применению данной модели на практике.

Разработка методологии анализа коррозионных поражений алюминиевых сплавов

Необходимость решения данной задачи возникает вследствие достаточно сложного коррозионного поведения алюминиевых сплавов в атмосфере. Рассмотрим показатели коррозии, применяющиеся для ее описания:

1. удельная потеря масс $\frac{\Delta m}{S}$. Используется в основном для большей части металлов, которые корродируют по типу общей коррозии. Соответственно пересчитывается в глубинный показатель коррозии. Поскольку рассчитывается при проведении большинства коррозионных испытаний, то применяется и для алюминиевых сплавов;

2. потери прочностных свойств (статических и усталостных). $\Delta\sigma_B = \frac{\sigma_B^0 - \sigma_B}{\sigma_B^0} \cdot 100\%$. Поскольку измеряется в процентах (долях), то он не особенно удобен для построения математической модели коррозии;

3. глубина коррозии. Для алюминиевых сплавов в качестве глубины коррозии можно принять величину максимальной глубины питтингов $h_{\text{пит}}^{\text{max}}$;

4. склонность к МКК и/или РСК. Данные параметры являются в большей степени описательными, и использованы для математической модели быть не могут.

Для построения математической модели необходимо выбрать какой-либо один показатель коррозии, и при помощи установленных взаимосвязей определять и другие. Наиболее удобен для этого показатель коррозии по изменениям потерь масс, поскольку при проведении натуральных испытаний образцов он определяется наиболее простым способом и с

наименьшей ошибкой. Для специалистов, работающих в области поддержания летной годности ВС, наибольшую ценность представляют собой глубина коррозии и потеря механических свойств.

Первоначально рассмотрим взаимосвязь между показателями коррозии удельной потерей масс и глубиной коррозии. С появлением новой техники – 3D профилометров задача определения величины $h_{\text{ПИТ}}^{\text{max}}$ значительно упростилась. Для связи между величиной $h_{\text{ПИТ}}^{\text{max}}$ и величиной $\frac{\Delta m}{S}$ можно использовать величину $k_{\text{ПК}}$ – фактор питтинговой коррозии, который определяется как $k_{\text{ПК}} = \frac{h_{\text{ПИТ}}^{\text{max}}}{\Delta h_m}$, где Δh_m – усредненная глубина коррозии, вычисляемая исходя из удельной потери массы образца. Анализ данных натуральных испытаний, в которых определялись глубины питтингов, представлен на рисунке 1, представляющим собой зависимость величины от величины Q/S , удельного количества электричества, по закону Фарадея пропорционально удельной потере масс. Исходя из полученных зависимостей можем сказать, что между величины $h_{\text{ПИТ}}$ и $\frac{\Delta m}{S}$ взаимосвязаны, вследствие этого для анализа коррозионных поражений алюминиевых сплавов можно использовать величину удельной потери масс $\frac{\Delta m}{S}$.

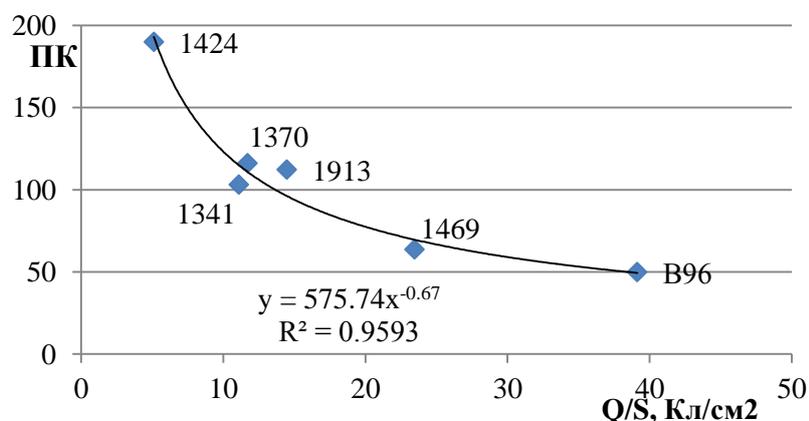


Рис. 1 – Зависимость фактора питтинговой коррозии от величины удельного количества электричества Q/S для некоторых сплавов при их натуральных испытаниях в ГЦКИ в течение 4 лет

Для анализа коррозионного поражения, характеризующее изменение прочностных свойств введем величину действующей глубины коррозии $h_{\text{проч}}$ – глубина проникновения коррозии, рассчитанная исходя из потери прочностных свойств по модели утонения толщины образца. В случае наличия только питтинговой коррозии (ПК) действующая глубина коррозии $h_{\text{проч}}$ в первом приближении приравняем глубине коррозии $h_{\text{проч}} \cong h_{\text{пит}}^{\text{max}}$. При появлении РСК и/или МКК, действующая глубина коррозии $h_{\text{проч}}$ будет превышать величину $h_{\text{пит}}^{\text{max}}$. Тогда можем записать:

$$h_{\text{проч}} \cong h_{\text{пит}}^{\text{max}} n_{\text{СК}},$$

где $n_{\text{СК}}$ – показатель коррозии (РСК и/или МКК) алюминиевых сплавов, соответствующий склонности алюминиевого сплава (полуфабриката, ТО) к данным видам коррозии. На основании результатов данных натурных испытаний в г. Батуми [14] для ряда сплавов построена математическая модель потери предела прочности с использованием данной зависимости. По результатам математической обработки зависимости потери массы от времени определили коэффициенты в уравнении $\Delta h_{\text{м}} = K_0 \cdot t^n$. Толщину прокорродировавшего слоя определяли как $\Delta h_{\text{проч}} = K_0 \cdot k_{\text{ПК}}^{n \cdot n_{\text{СК}}}$. Величину $k_{\text{ПК}}$ определяли по полученной функциональной зависимости (рисунок 1) за весь срок натурных испытаний. Величине $n_{\text{СК}}$ определяли по результатам наилучшей сходимости расчетных и экспериментальных данных. Пример моделирования на сплаве В93 представлен на рисунке 2. Данные по моделированию для сплавов 1201, В93 и В95 представлены в таблице 1.

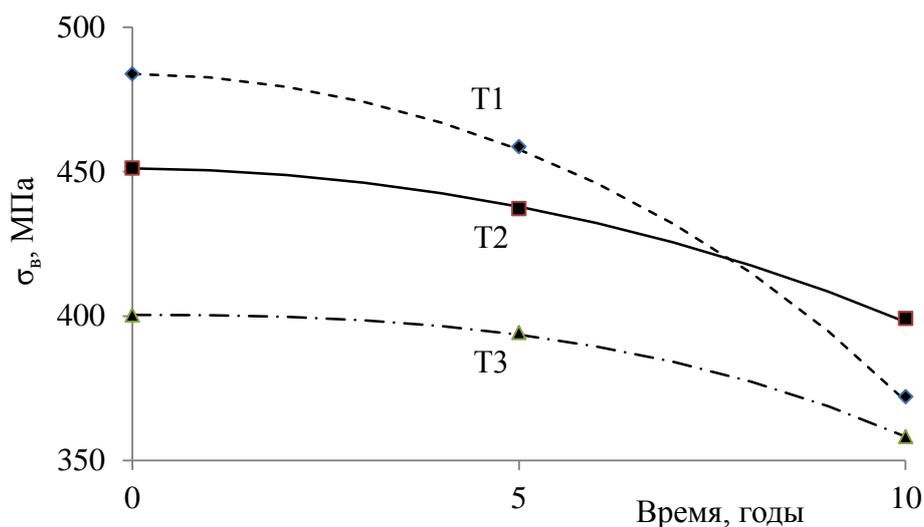


Рис. 2 – Зависимость потери предела прочности образцов сплава В93пч (поковки) для различных типов термообработок после натурной экспозиции. Точками отмечены экспериментальные данные, кривые – результат моделирования

Таблица 2

Данные по расчету величины $n_{СК}$ для сплавов В95пч, В93пч и 1201 после проведения натурной экспозиции

Параметр	1201Т		В93пч, поковки			В95пч, поковки		
	лист	плита	Т1	Т2	Т3	Т1	Т2	Т3
$n_{ПК}$	1	1	1,83	1,53	1,43	1,61	1,5	1,45
Склонность к РСК или МКК	Нет*	Нет*	Уменьшается →			Уменьшается →		

* - наличие РСК и МКК после 5 лет натуральных испытаний в ГЦКИ не обнаружено.

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, величина $n_{СК}$ качественно совпадает со склонностью сплавов к РСК и/или МКК, однако для количественного определения ее зависимости необходимо проделать достаточно большую работу, которая включала в себя достаточно большой объем длительных натуральных испытаний. Кроме того, при достаточно высоких значениях фактора питтинговой коррозии глубина коррозии будет сильно отличаться от величины $h_{проч}$.

Вследствие этого определение зависимости потери прочностных свойств от величины удельной потери масс предлагается осуществлять с помощью проведения ускоренных испытаний, представляющих собой нанесение коррозионных поражений, идентичных получаемым в атмосферных условиях, с различной степенью интенсивности. Затем проведение исследования прокорродированных образцов с построением корреляционных зависимостей от параметров, характеризующих коррозию, т.е. скорости коррозионного процесса и длительности его протекания. Анализ методов коррозионных испытаний приводит к выводу, что наиболее подходящим методом для этого является электрохимический, т.е. анодное растворение (АР). Данный метод позволяет наносить нормированные коррозионные поражения.

Разработка методологии интерполяции результатов натуральных испытаний алюминиевых сплавов с целью определения годовых коррозионных потерь в предполагаемых местах базирования изделий АТ

Решение данной задачи предлагается проводить на основе существующей системы ФДО. Необходимо только увеличить достоверность применяемых уравнений. Для этого можно использовать следующие подходы:

1. Применение чистого алюминия, особенно для зон с низкой концентрацией хлорид-ионов, приводит к большей погрешности получаемых данных за счет низких скоростей коррозии. Необходимо применение и других сплавов;
2. Использование других типов ФДО;
3. Установление сроков испытаний алюминиевых сплавов.

Наиболее важный здесь пункт о сроках испытаниях алюминиевых сплавов. Если для испытаний таких металлов, как железо, цинк и медь, продолжительность испытаний – один год оправдан, то при испытании алюминиевых сплавов необходимо ввести корректировку. Рассмотрим зависимость скорости коррозии ряда алюминиевых сплавов в ГЦКИ от

времени испытаний (рисунок 4). Как видно из рисунка, некоторое стационарное состояние, сопровождающееся относительным постоянством скорости коррозии, наблюдается только лишь при 2 летнем сроке испытаний. С учетом вышенаписанного, для разработки ФДО с меньшей погрешностью, необходимо увеличить продолжительности испытаний до двух лет и включить в список испытываемых материалов помимо чистого алюминия, алюминиевый сплав с пониженной коррозионной стойкостью – 1163Т.

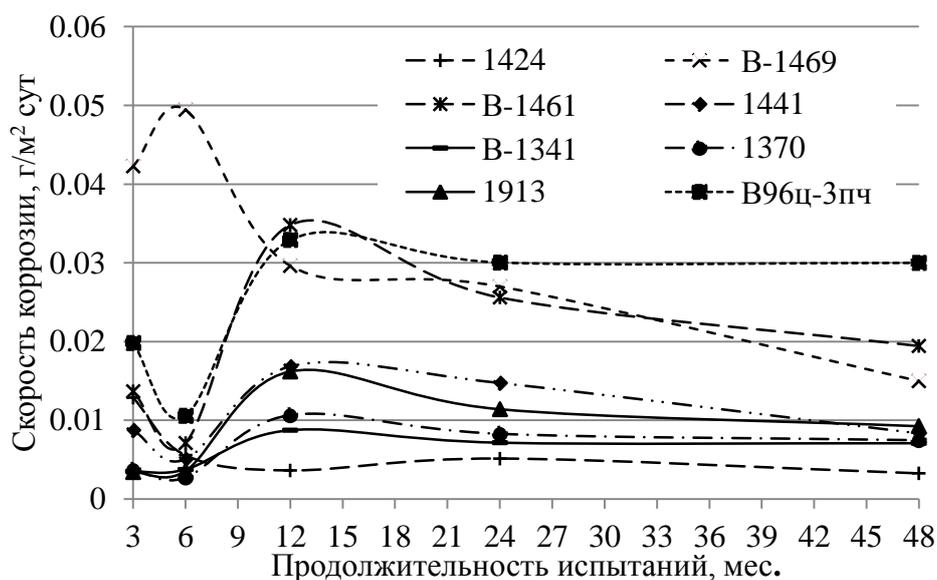


Рис. 3 – Зависимость скорости коррозии от времени натуральных испытаний некоторых алюминиевых сплавов

Разработка методологии прогнозирования коррозионных потерь алюминиевых сплавов на основе ускоренных и краткосрочных натуральных испытаний

Решение данной задачи возможно при помощи двух подходов:

1. Разработка ускоренных имитационных испытаний с определением коэффициента ускорения $K_{уск}$ по результатам годовых натуральных испытаний. Имитационные (циклические) испытания разрабатываются на основе циклов испытаний, представляющих собой испытания в камере влажности и в камере солевого тумана. Данные испытания активно

разрабатываются в основном для автомобильной промышленности – применительно к стали с ЛКП. В данном случае для алюминиевых сплавов можем только констатировать необходимость разработки вышеуказанной методики.

2. Построение модельных представлений коррозии алюминиевых сплавов для дальнейшей разработки модели коррозии определенного материала по результатам краткосрочных испытаний. Точность данного прогноза должна быть выше, нежели в первом случае, но данные подходы независимы друг от друга и могут приниматься поочередно с целью получения все более точной модели коррозии алюминиевого сплава.

По результатам исследований результатов натурных испытаний в нашей работе предлагаются следующие модельные представления, отраженные на рисунке 4.

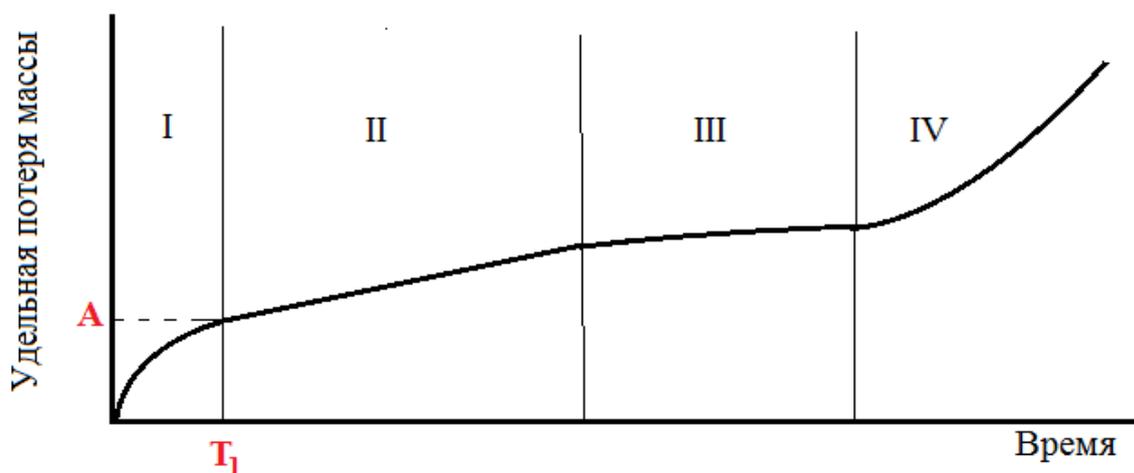


Рис. 4 – Схематическая кинетическая зависимость атмосферной коррозии алюминиевого сплава; периоды могут пересекаться

- I. В начальный момент времени (до 2 лет) наблюдаются достаточно сильные изменения в скорости коррозии алюминиевых сплавов. Для сплавов с пониженной коррозионной стойкостью и/или в более

- агрессивных условиях коррозионные процессы протекают с повышенной скоростью, которая в дальнейшем уменьшается;
- II. После этого периода происходит образование так называемой коррозионной структуры поверхности алюминиевого сплава, и скорость коррозии остается постоянной;
- III. Уменьшение скорости коррозии алюминиевых сплавов вследствие возможной пассивации в устье питтингов;
- IV. Увеличение скорости коррозии вследствие появления и развития РСК.

С учетом данных представлений можем записать кинетическое уравнение коррозии алюминиевого сплава в общем виде:

$$K = A + B \cdot (t - t_1)^n$$

где A , B и n – константы, определяемые из натуральных испытаний, представляющие собой: A – начальное увеличение скорости коррозии за первый год испытаний по сравнению со стационарным состоянием; B – скорость коррозии; n – степень торможения процесса коррозии; t – время; t_1 – время установления стационарного процесса коррозии алюминиевого сплава, приблизительно равная двум годам.

Концепция проведения комплексных коррозионных испытаний

С учетом проведенных исследований предлагается концепция проведения ККИ, отображенная на рисунке 5.

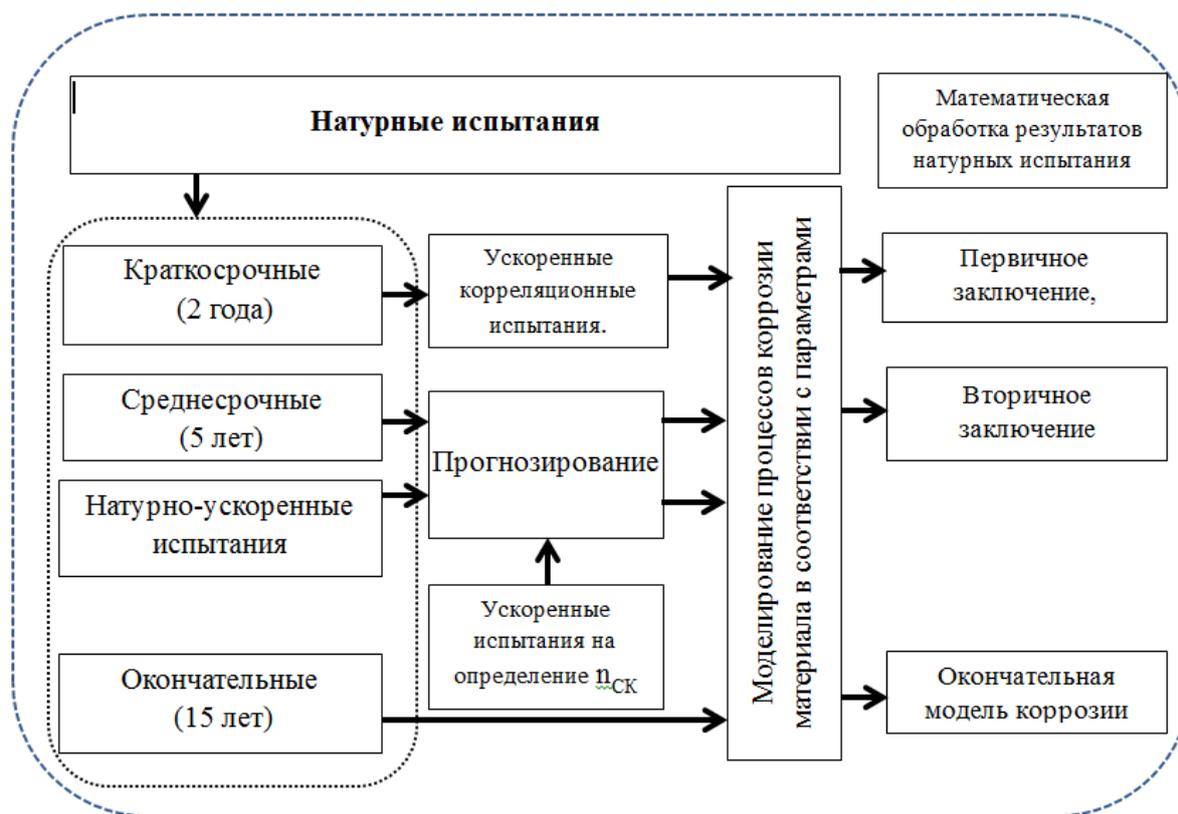


Рис. 5 – Схема проведения комплексных коррозионных испытаний

Выводы:

1. Разработана концепция проведения комплексных коррозионных испытаний (ККИ);
2. Установлен показатель коррозии алюминиевых сплавов, необходимый для проведения моделирования процессов коррозии;
3. Предложена кинетическая модель атмосферной коррозии алюминиевых сплавов;
4. Установлен набор методик, необходимых для проведения ККИ:
 - а) Методика имитационных (ускоренных циклических) испытаний;
 - б) Методика определения $n_{СК}$ – коэффициента ускорения потерь механических свойств за счет РСК и МКК;
 - в) Методика определения кинетики РСК.

5. Уточнены необходимые временные интервалы проведения натуральных испытаний;

Литература

1. Синявский В.С., Вальков В.Д., Будов Г.М. Коррозия и защита алюминиевых сплавов – М.: Металлургия, 1979г. – 224 с.
2. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
3. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–183.
4. Садков В.В., Миркин И.И. Обеспечение коррозионной стойкости алюминиевых конструкций в самолетах «Ту». // Цветные металлы. 2006. № 11. С. 73–76.
5. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов. // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. №187. С. 83–91.
6. Кацура А.В. Исследование влияния коррозионных повреждений на долговечность элементов конструкций летательных аппаратов. автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Красноярск, 2001.
7. Бычков А.С., Игнатович С.Р., Моляр А.Г. Основные виды и причины разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов отечественных воздушных судов транспортной категории // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии 2015. № 70. С. 136–151.
8. Семин А.В. Метод уточнения характеристик живучести силовых элементов планера длительно эксплуатируемых воздушных судов. автореф. дисс. ... канд. тех. наук., М., 2011.

9. Михайловский Ю.Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. – М.: Metallurgy. – 1989. – С. 102.

10. ГОСТ 9.040-74. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях. – С. 14.

11. Михайлов А.А., Тидблад Дж., Кучера В. // Защита металлов. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 601–610.

12. Михайлов А.А., Стрекалов П.В., Панченко Ю.М. Моделирование атмосферной коррозии металлов и коррозионной картографирование территорий. Современные проблемы физической химии. С. 481–494.

13. А.В. Лапаев, А.В. Семин, В.С. Шапкин. Применение информационно-аналитической базы данных для анализа технического состояния конструкции планера транспортных самолетов. // Научный Вестник МГТУ ГА, 2012, № 175, С. 7–12.

14. М.В. Антонова, Д.Г. Божевалов, Н.А. Котелевец, А.В. Семин, Ю.С. Соколов, И.Г. Хлебникова, В.С. Шапкин. Оперативный критерий оценки коррозионного состояния ВС. // Научный Вестник МГТУ ГА, 2008, № 130, С. 59–67.

15. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость и свойства алюминиевых сплавов авиационного назначения в условиях морского субтропического климата // автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., 2006.

16. 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. С. 116–126.

17. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов. // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3 (42). С. 24–32.

18. Alexopoulos N.D., Papanikos P. Experimental and theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy. // *Materials Science and Engineering A* 498 (2008) 248–257.

19. Pantelakis Sp.G., Daglaras P.G., Apostolopoulos Ch.Alk. Tensile and energy density properties of 2024, 6013, 8090 and 2091 aircraft aluminum alloy after corrosion exposure. // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 33 (2000) 117–134.

20. Sprowls D.O. Evaluation of pitting corrosion, in *ASM Handbook v. 13. Corrosion*. 1987. P. 516-521.

21. Sowinski G., Sprowls D.O. Weathering of Aluminum Alloys, in *Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor, Ed. 1982, p 297–328.

УДК 620

Влияние производных фенотиазина на электроосаждение цинка и его коррозию в присутствии сульфатредуцирующих бактерий

Грибанькова А.А.¹, д.п.н., к.х.н.; Гурченко В.В.¹; Ларина В.В.¹;
Шмелева Е.А.¹; Агиевич М.А.¹, к.х.н.

AGribankova@kantiana.ru, VGurchenko@kantiana.ru, surinac@mail.ru, myamina@mail.ru,

¹БФУ им. И. Канта

Аннотация:

В данной работе исследовано влияние 7 органических соединений – производных фенотиазина – на качество цинковых покрытий при электроосаждении цинка в сернокислом электролите, а также коррозионную стойкость этих покрытий в среде, содержащей сульфатредуцирующие бактерии.

Ключевые слова:

микробиологическая коррозия, сульфатредуцирующие бактерии, биоцид, ингибитор коррозии.

Вводная часть

Сплавы железа являются одними из самых широко используемых конструкционных материалов. Разрушение металлоконструкций, в том числе и из-за воздействия микроорганизмов, приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик, к снижению срока службы, частым авариям, а также большим экономическим затратам [1].

В анаэробных средах из-за широкой доступности сульфатов широко распространены сульфатредуцирующие бактерии. Они получают свою биохимическую энергию для роста путем восстановления сульфатов до сульфидов. Это приводит к частичному растворению ионов железа и образованию на поверхности стали сульфидной пленки, что ведет к ускорению процесса коррозии [2, 3].

Среды, где присутствуют сульфатредуцирующие бактерии, относятся к достаточно агрессивным средам из-за накопления биогенного сероводорода. Негативное действие сероводорода заключается не только в ускорении процесса коррозии, но и в возникновении сульфидного коррозионного растрескивания, которое тяжело обнаружить [4].

Одним из наиболее эффективных способов повышения коррозионной стойкости металлов является создание композиционных покрытий с использованием ингибиторов коррозии.

В работе были исследованы органические вещества, которые ранее не использовались в качестве ингибиторов коррозии. Известно, что соединения ряда фенотиазина обладают бактерицидным действием, в связи с чем были предположены его биоцидные свойства. Так как производные фенотиазина имеют строение, характерное для антиокислителей, они могут способствовать замедлению анодной реакции, поэтому эти вещества можно применять для улучшения противокоррозионных характеристик покрытий. Кроме того, в молекулах этих соединений имеются гетероциклы, следовательно, производные фенотиазина, вероятно, будут хорошо адсорбироваться на поверхности металла [5,6].

Методика исследования

В работе было исследовано влияние 7 различных органических соединений (ОС) ряда фенотиазина:

- 1). 1,4-дигидрокси-2-(N-1,4-диаминобензол)-5-(N-фенотиазинил)-бензол;

- 2). 2-имино-4,10-оксатиол-7-(фенотиазин-10-ил)-9-гидроксиантрацен;
- 3). 2,3,5-трихлор-6-N-фенотиазинил-1,4-гидрохинон;
- 4). 1,4-дигидрокси-2-(N-фенотиазинил)-бензол меди;
- 5). 1,4-дигидрокси-2-(N-фенотиазинил)-бензол;
- 6). 2-имино-4-фенотиазин-10-ил-1,3-бензоксатиол-5-ол;
- 7). 2-(N-3,7-дибромфенотиазинил)-гидрохинон.

На сталь Ст3 было нанесено цинковое покрытие с включением данных органических соединений гальваническим методом. Цинкование производилось при плотностях тока 50, 100, 200, 300, 400 А/м². Исследуемые вещества добавлялись в электролит в концентрации $1 \cdot 10^{-3}$, $2 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Полученные осадки подвергались воздействию сульфатредуцирующих бактерий в замкнутой системе. Выращивание чистой культуры *Desulfovibrio* проводилось путем отбора пробы воды из природного источника и многократного пересевания бактерий на среде Постгейта «Б».

Для выращивания сульфатредуцирующих бактерий использовались пробирки, в каждую из которых помещали стальную пластину марки Ст3 для стимуляции роста сульфатредуцирующих бактерий [7]. Для обеззараживания пластины облучали в бактерицидной камере в течение часа.

Затем в пробирку добавляли 10 мл культуры *Desulfovibrio* и заполняли средой Постгейта «Б». Пробирки плотно закрывали резиновыми пробками, следя за тем, чтобы туда не попадали пузырьки воздуха. Образцы помещали в термостат с температурой 37,5 °С. Инкубационный период культуры *Desulfovibrio* составляет 48 часов.

Через 48 часов в пробирку с предварительно выращенной чистой культурой сульфатредуцирующих бактерий помещали заранее

взвешенную на аналитических весах и подготовленную пластинку с осадком. После этого в течение 7 суток проводили испытания.

Для определения биоцидного и ингибирующего эффектов органических соединений исследовались следующие параметры: учет численности бактерий, pH среды, электродный потенциал пластины, количество биогенного сероводорода, скорость коррозии.

Изучение влияния органических соединений на численность сульфатредуцирующих бактерий проводилось каждый день на протяжении всего испытания. Для учета численности использовался микроскоп марки Carl Zeiss. Исследование проводили в камере Горяева. Общее количество бактерий в объеме коррозионной среды рассчитывали по формуле:

$$N = \frac{\alpha \cdot 1000}{n \cdot S}, \quad (1)$$

где α – среднее число клеток в квадрате в камере Горяева, n – глубина камеры (0,1 мм), S – площадь квадрата сетки окуляра при используемом увеличении окуляра (1/400 мм²).

Измерение pH коррозионной среды проводили каждый день в течение всего времени экспозиции на стационарном pH-метре HANNA HI 2215.

Измерение потенциала пластины проводили с помощью мультиметра марки АВМ-4403 относительно хлорсеребряного электрода.

Определение содержания биогенного сероводорода проводили методом обратного йодометрического титрования. Для этого отбирали пробу объемом $5 \cdot 10^{-3}$ л из хорошо перемешанной среды и осаждали сероводород $5 \cdot 10^{-3}$ л 0,1н раствора ацетата свинца (II).

Осадок фильтровали и промывали горячей водой. Промытый фильтр помещали в колбу и прибавляли $2,5 \cdot 10^{-3}$ л 0,05н раствора йода, который заранее подкисляли серной кислотой. Полученный образец титровали

0,05н раствором тиосульфата натрия до характерного свето-желтого цвета. Далее добавляли крахмал, дотитровывали раствором тиосульфата натрия до обесцвечивания раствора. Концентрацию биогенного сероводорода рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{(ak_1 - bk_2) \cdot 0.85 \cdot 1000}{V}, \quad (2)$$

X – концентрация сероводорода, мг/л, a – объем прибавленного раствора йода, мл, k_1 – поправочный коэффициент для приведения концентрации йода к 0,05н, b – объем тиосульфата, мл, k_2 – поправочный коэффициент для приведения концентрации раствора тиосульфата к 0,05 н, V – объем пробы исследуемого раствора, мл.

Через 7 суток образцы извлекали, зачищали от продуктов коррозии и снова взвешивали.

В результате коррозионного процесса были получены данные об убыли массы образцов. Скорость коррозии вычисляли по формуле:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (3)$$

где K – скорость коррозии, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$, S – площадь поверхности образца, м^2 , Δm – убыль массы образца, кг, τ – время проведения испытания, сут.

Ингибирующий эффект добавок определяли по формуле:

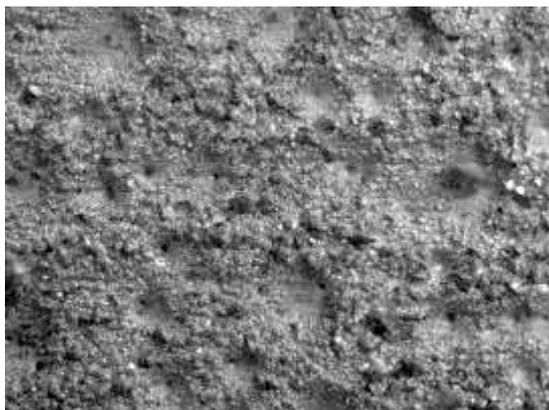
$$Z = \frac{K_0 - K}{K_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где K_0 – скорость коррозии в контрольной пробе, K – скорость коррозии в пробе с органическим веществом.

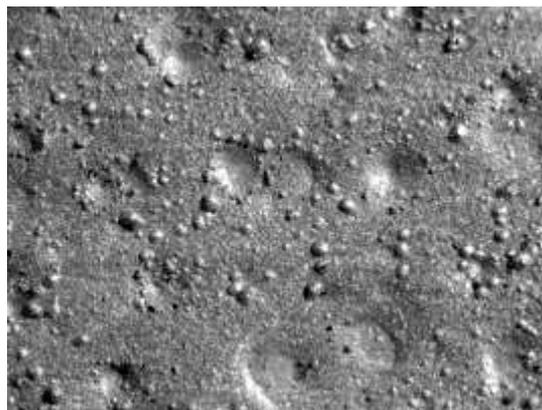
Экспериментальная часть

Первоначально полученные осадки были оценены визуально, а также с помощью микроскопа марки Carl Zeiss. Отмечено, что для ОС 1 покрытия с наименьшей концентрацией получают наиболее мелкокристаллические, блестящие. Для ОС 2 покрытия так же обладают блеском, при этом с повышением концентрации блеск усиливается. При концентрации $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л появляется желтый оттенок. Для ОС 3 покрытия мелкокристаллические. Наиболее плотные покрытия получают для плотности тока 400 А/м^2 . На рисунке 1 представлены снимки с микроскопа.

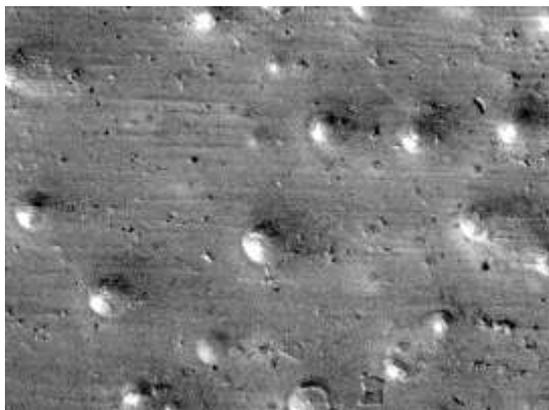
а)



б)



в)



г)



Рис. 1. Микроскопическое исследование поверхности осадка, а – контроль, б – ОС 1 $C=1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $j=200 \text{ А/м}^2$, в – ОС 2 $C=2 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $j=400 \text{ А/м}^2$, г – ОС 3 $C=5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $j=400 \text{ А/м}^2$

При исследовании биоцидного действия выбранных органических соединений было установлено, что наиболее эффективно бактерицидные свойства проявляются в пробе, содержащей образец с покрытием с ОС 1 при концентрации $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 200 А/м^2 . В данной пробе на протяжении всего времени экспозиции отмечалось самое сильное снижение количества активных бактериальных клеток (рис. 2).

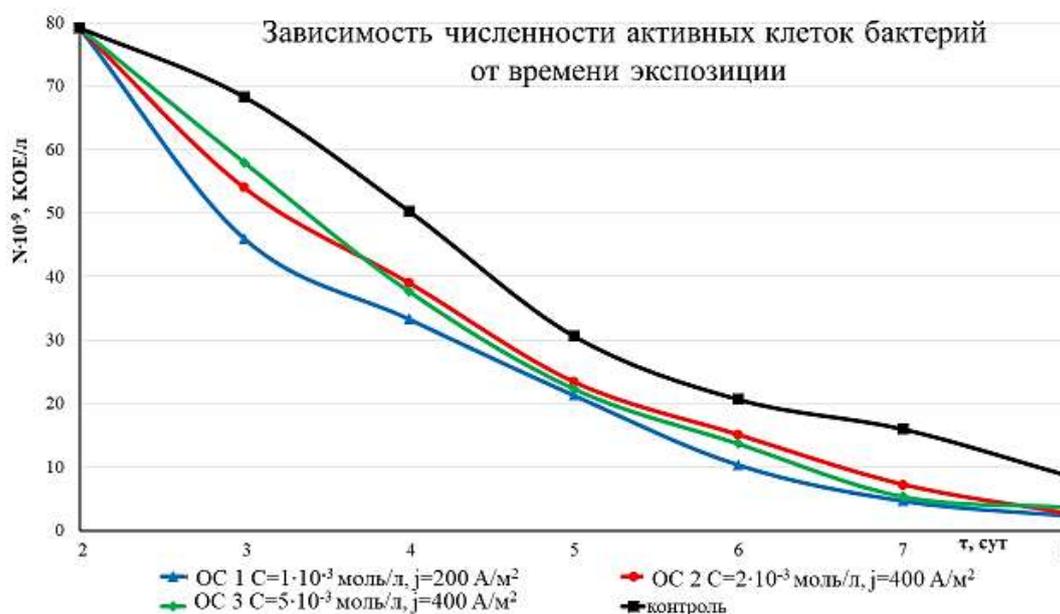


Рис. 2 – Зависимость численности активных клеток бактерий от времени экспозиции

При изучении влияния органических соединений на концентрацию биогенного сероводорода было отмечено, что самое сильное снижение концентрации биогенного сероводорода отмечается в пробе с ОС 1 при концентрации $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 200 А/м^2 , причем на 4-е сутки эксперимента наблюдается снижение концентрации сероводорода в два раза относительно контрольной

пробы. К завершению жизненного цикла бактерий степень снижения концентрации биогенного сероводорода составляет 80% (рис. 3).

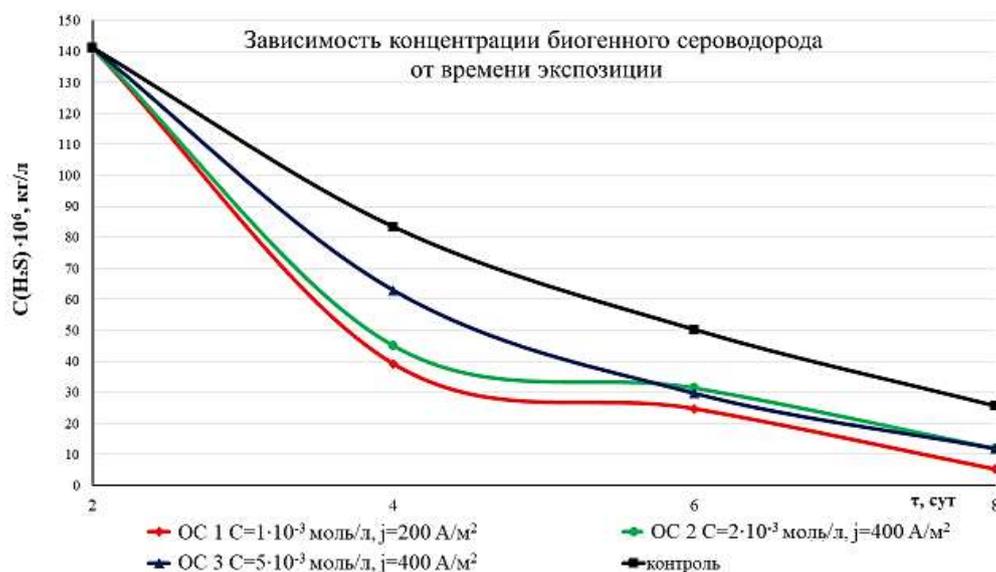


Рис. 3 – Зависимость концентрации биогенного сероводорода от времени экспозиции

При исследовании влияния ОС на потенциал пластины сильное смещение потенциала среды в сторону более положительных значений относительно контроля было выявлено в пробах с ОС 2 при концентрации $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 400 А/м^2 и с ОС 3 при концентрации $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 400 А/м^2 . Это позволяет судить о хорошем ингибирующем действии данных ОС. Причем максимальное ингибирующее действие было отмечено в пробах, содержащих ОС 3 (рис. 4).

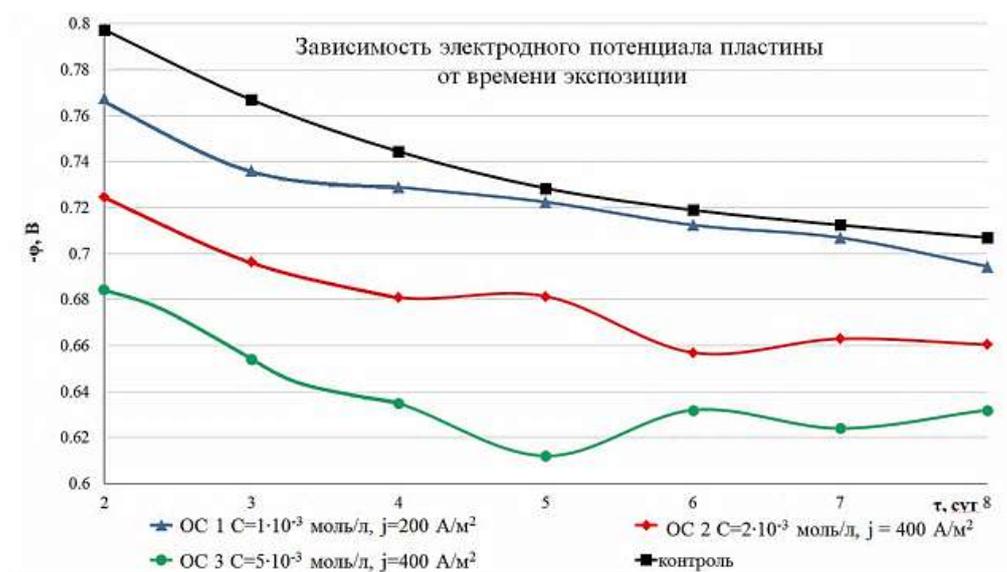


Рис. 4 – Зависимость электродного потенциала пластины от времени экспозиции

В пробирках с веществами, показавшими наилучшие биоцидные действия и наибольшую коррозионную стойкость (ОС 1, ОС 2, ОС 3) также наблюдается повышение рН относительно контроля. Это обусловлено гибелью сульфатредуцирующих бактерий, а следовательно, и уменьшением концентрации сероводорода.

На диаграмме скорости коррозии (рис. 5) для различных исследуемых образцов показано, что самое эффективное подавление коррозии было отмечено в образце с включенным в покрытие ОС 3 при концентрации $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 400 А/м^2 , при этом отмечалось снижение скорости коррозии в 5 раз относительно контрольной пробы.

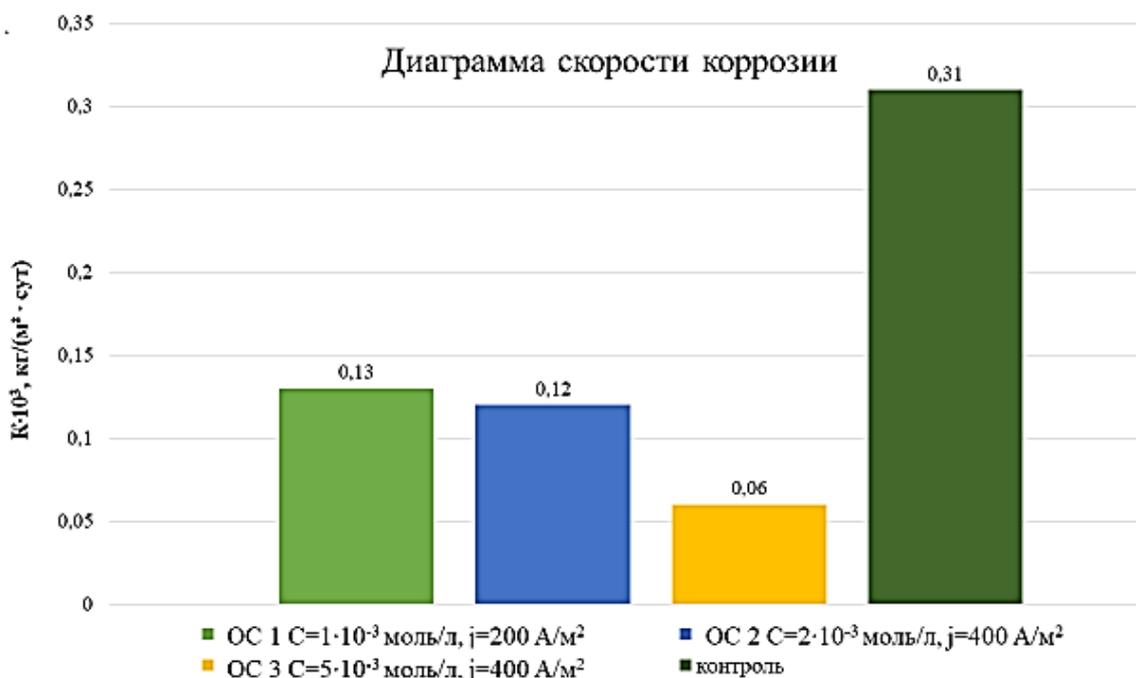


Рис. 5 – Диаграмма скорости коррозии

По полученным данным был рассчитан защитный ингибирующий эффект. Он составил для ОС 1 58%, для ОС 2 61%, для ОС 3 81%.

Выводы:

1. Подобраны эффективные ингибиторы коррозии для создания композиционного покрытия.
2. Исследовано влияние органических соединений, включенных в покрытие на развитие сульфатредуцирующих бактерий. Показано, что лучшее биоцидное действие проявляет 1,4-дигидрокси-2-(N-1,4-диаминобензол)-5(N-фенотиазинил)-бензол в концентрации $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 200 А/м^2 .
3. Максимальное снижение скорости коррозии отмечено для образцов с 2,3,5-трихлор-6-N-фенотиазинил-1,4-гидрохинон в концентрации $5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, введенном в покрытие при плотности тока 400 А/м^2 . Защитный ингибирующий эффект для этого соединения составил 81%.

Литература

1. Ru Jia Electron transfer mediators accelerated the microbiologically influence corrosion against carbon steel by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm // Ru Jia, Dongqing Yang, Dake Xu, Tingyue Gu / *Bioelectrochemistry*. – Vol. 5. – 2017. – P. 25–50.
2. Yang Zhang Metabolic dynamics of *Desulfovibrio vulgaris* biofilm grown on a steel surface, biofouling / Yang Zhang, Guangsheng Pei, Lei Chen & Weiwen Zhang // *Bioelectrochemistry*. – 2016. – P. 725–736.
3. Речкин А. И., Ладыгина Г. Н. Геохимическая роль микроорганизмов: Электронное учебное пособие. – Нижний Новгород: НГУ, 2010. – 48 с.
4. Mohita Sharma Biocide-mediated corrosion of coiled tubing / Mohita Sharma, Dongshan An, Tao Liu, Tijan Pinnock, Frank Cheng, Gerrit Voordouw // *PLOS ONE*. – Vol. 4. – 2017. – P. 36.
5. Хаттон Р. Е. Жидкости для гидравлических систем: учебник / Хаттон Р. Е. – Москва: изд. Химия. – 1965. – 166 с.
6. Енишерлова О. М. Синтетические смазочные материалы и жидкости: учебник / Енишерлова О. М. – Москва: изд. Химия. – 1965. – 386 с.
7. Гориленко Н. Н. Влияние физико-химических факторов на биокоррозию стали в присутствии накопительной культуры сульфатовосстанавливающих бактерий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.14. – Москва, 1994. – 19 с.

УДК 539.620

Применение мессбауэровской спектроскопии к изучению коррозии в морском климате

Филиппов В.П.¹, д.ф.-м.н.; Лауэр Ю.А.¹, к.ф.-м.н.;

Калин Б.А.¹, д.ф.-м.н.; Петров В.И.¹, к.т.н.

vpfilipov@mephi.ru, juliashika@rambler.ru, bakalin@mephi.ru, vipetrov@mephi.ru

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

Аннотация:

В работе показаны возможности мёссбауэровской спектроскопии в изучении фазового состава оксидных плёнок и распределения фаз по глубине коррозионных слоёв, образовавшихся на стальных деталях конструкций, подвергнутых длительному воздействию морской среды.

Ключевые слова:

мессбауэровская спектроскопия, коррозия сталей в море.

Abstract:

The possibilities of Mössbauer spectroscopy in determining of oxide phase content and phase distribution in oxide films formed under influence marine environment on steel constrictions and sheep are shown.

Keywords:

Mössbauer spectroscopy, steel corrosion in marine.

1. Введение

Коррозия и погодное разрушение материалов – вечные проблемы, с которыми постоянно сталкивается человечество. Долговечность стальных конструкций в значительной степени определяется окружающей средой. Важна идентификация коррозионных слоёв, так же как и содержание каждого из них в продуктах коррозии, особенно если нужно получить лучшее понимание процессов и создать улучшенные стали с более низкими скоростями коррозии.

Чтобы понять, как различные атмосферные условия управляют формированием продуктов коррозии, и роли некоторых оксидов в защите стали через увеличенное сопротивление коррозии (коррозионной стойкости), необходимо иметь полный анализ химического состава и фазового состава покрытий, так же как картографии их местоположения в пределах покрытия [1].

Существует ряд методов исследований, таких как Мессбауэровская спектроскопия, микро-рамановская спектрометрия, рентгеновская дифракция, инфракрасная спектрометрия, позволяющих идентифицировать образующиеся оксиды и получать информацию об их количественном содержании и распределении по толщине покрытий. За прошлое десятилетие применение метода мессбауэровской спектроскопии для изучения атмосферной коррозии конструкционных сталей показало, что он наиболее информативный. Примером является идентификация магнетита Fe_3O_4 и маггемита $\gamma-Fe_2O_3$. Оба оксида имеют кубическую структуру и почти идентичные параметры решетки при комнатной температуре, что делает их неразличимыми при использовании рентгеновской дифракции [2]. Однако их магнитные и электрические свойства весьма различны, и это позволяет Мессбауэровской спектроскопии однозначно идентифицировать каждый оксид. Способность Мессбауэровской спектроскопии точно измерять температурные

зависимости магнитных и электрических параметров оксидов привели к точной характеристике продуктов коррозии и лучшему пониманию влияния среды и химических факторов на их формирование. Мессбауэровская идентификация может обеспечить очень точную корреляцию между процессом коррозии и местной (локальной) окружающей средой.

Цель данной работы – показать возможности мессбауэровской спектроскопии применительно к изучению коррозии на примере исследования сталей, подверженных длительному воздействию морской воды.

2. Подготовка образцов и экспериментальные методы

В качестве образцов для исследования выбраны элементы стальных конструкций в г. Сочи, которые находятся в непосредственной близости от воды Черного моря и в воде. Материалом служила сталь марки ВСТЗКП2 ГОСТ380-71, состав: Fe + 0.22% C, 0.6% Mn, 0.07% Si, 0.04% P, 0.05% S, 0.3% Cr, 0.3% Ni, 0.3% Cu; 0.08% As. Были взяты образцы конструкций, подверженных воздействию морской атмосферы, обращенные как в сторону моря, так и в сторону суши, а также образцы конструкций, находящихся в морской воде.

Оксидные слои отделялись механически. Из отделенной оксидной плёнки были подготовлены поглотители. Оксидная пленка измельчалась в ступе, затем из образовавшегося оксидного порошка готовился поглотитель толщиной 20–40 мг/см². Подробное описание метода подготовки поглотителей описан в работе [3]. Таким образом были получены образцы различных слоев, по результатам исследования которых можно судить о распределении различных оксидов по толщине пленки. Мессбауэровские спектры получены на установке «Персей» (ЯГРС6), работающей в режиме постоянных скоростей, был использован Мессбауэровский источник ⁵⁷Co(Cr). Металлическое альфа-железо было

использовано в качестве эталонного образца, и изомерные сдвиги приведены относительно него. Обработка мессбауэровских спектров проведена с помощью ряда специальных программ. Модели спектров, их расшифровка и интерпретация выполнены с учетом работ [2, 3] и дополнительных исследований.

3. Результаты и обсуждение

Основные оксиды, которые могут образоваться на поверхности стали, приведены в **Ошибка! Источник ссылки не найден..** Оксид-гидрооксид железа (FeOOH) обычно наблюдается при атмосферной коррозии, тогда как другие соединения формируются в основном в более специфических условиях – при воздействии высоких температур, трения, водной среды – которые, вообще говоря, являются менее окисляющими, чем воздействие атмосферы **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

Таблица 1

Список оксидов железа, идентифицированных в различных видах ржавчины, сформированных на конструкционных сталях

Название оксида	Формула	Название оксида	Формула
Феррогидрит	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Вьюстит	FeO
Геотит	$\alpha\text{-FeOOH}$	Гематит	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Акагениит	$\beta\text{-FeOOH}$	Магемит	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Лепидокрит	$\gamma\text{-FeOOH}$	Магнетит	Fe_3O_4
Ферроксигит	$\delta\text{-FeOOH}$		

Полученные Мёссбауэровские спектры и результаты их обработки приведены на рисунках 1–3.

На рисунке 1 представлены спектры образцов, которые находились под влиянием атмосферы вблизи моря и были обращены в сторону суши. На рисунке 2 представлены спектры образцов, которые находились под влиянием атмосферы вблизи моря и были обращены в сторону моря. На

рисунке 3 представлены спектры образцов, находившихся в море. Характер спектров различен и зависит в основном от того, в какой среде находились образцы. Также можно наблюдать и различия спектров в зависимости от глубины слоя коррозионной пленки. Структура пленки неоднородна по толщине и, кроме того, зависит от позиции образца относительно моря. Также было замечено, что образцы имеют разный цвет поверхности. Подробный качественный и количественный анализ спектров представлен в работах [3, 5]. Он позволил выявить следующие факты.

В оксидных пленках наблюдается присутствие фаз Fe^{2+} и Fe^{3+} в различных типах соединений, таких как γ - Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , (α -, β -, γ -) $FeOOH$. На сооружениях, которые находились в периодическом контакте с водой, защитный слой не создавался, в отличие от сооружений, расположенных в 10 м от моря, где был создан защитный слой. В структуре оксидной пленки, периодически контактирующих с водой, обнаружены следующие соединения: фаза акаганеита, образующаяся в условиях высокого содержания хлоридов в окружающей среде, и фазы маггемита и магнетита, обусловленные длительным периодом влажности. В образцах, расположенных на расстоянии 10 м от моря, на средней глубине установлено наличие суперпарамагнитного гетита, который может создавать защитный слой.

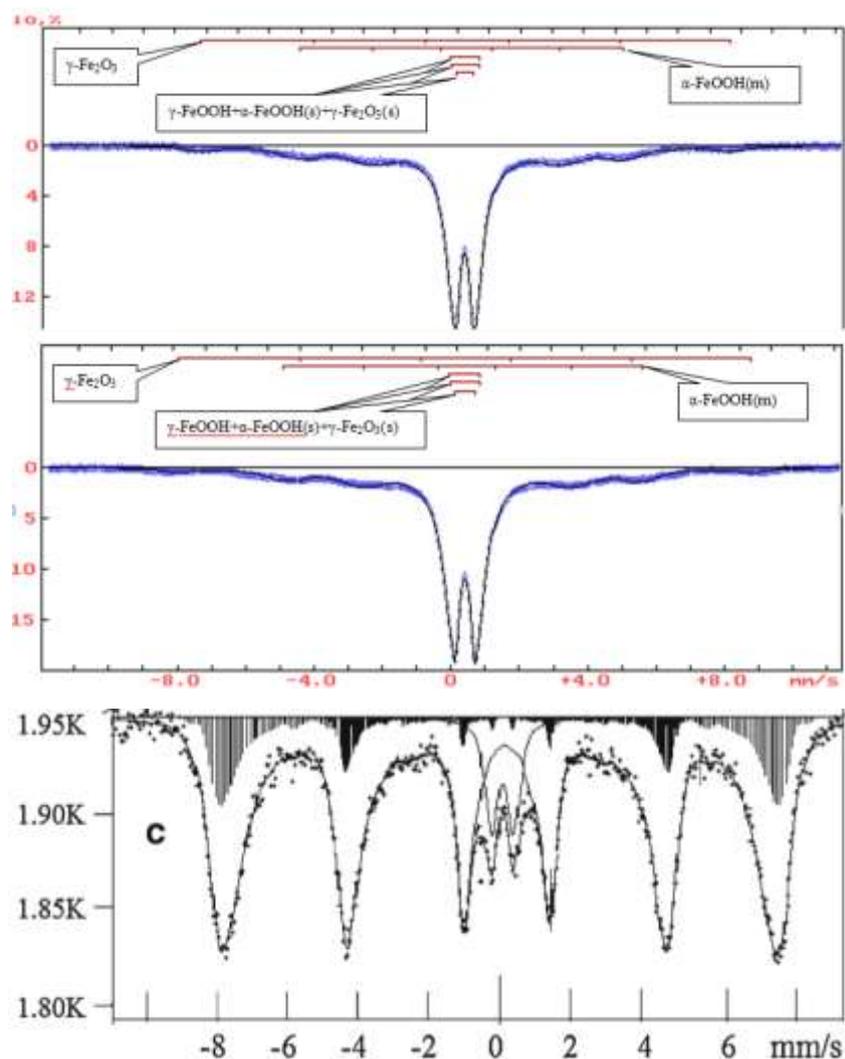


Рис. 1 – Спектры образца, удаленного от моря на 10 метров и обращенного в противоположную от моря сторону: а) поверхность оксидной пленки, б) промежуточный слой оксидной пленки, в) низкотемпературный спектр промежуточного слоя оксидной пленки

Для оценки размеров частиц была проведена регистрация низкотемпературного Мессбауэровского спектра [1] (рис. 2с). Установлено увеличение площади магнитных составляющих спектра, что свидетельствует об уменьшении размера соответствующих им частиц.

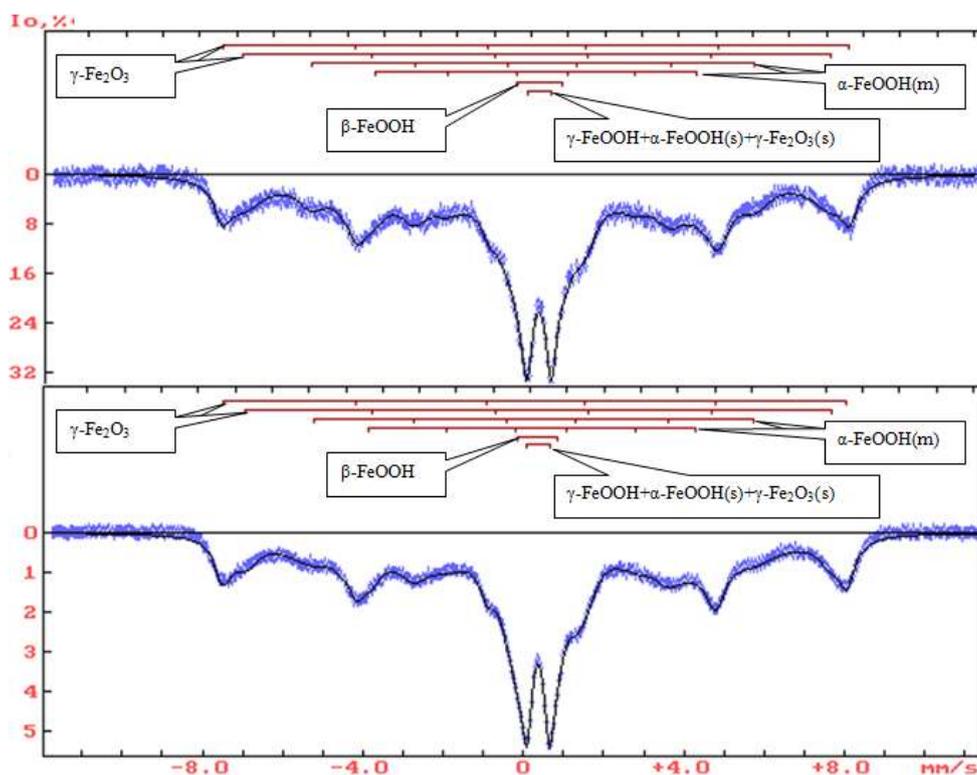


Рис. 2 – Спектры образца, удаленного от моря на 10 метров и обращенного в сторону моря: а) поверхность оксидной пленки, б) промежуточный слой оксидной пленки, с) с глубины оксидной пленки

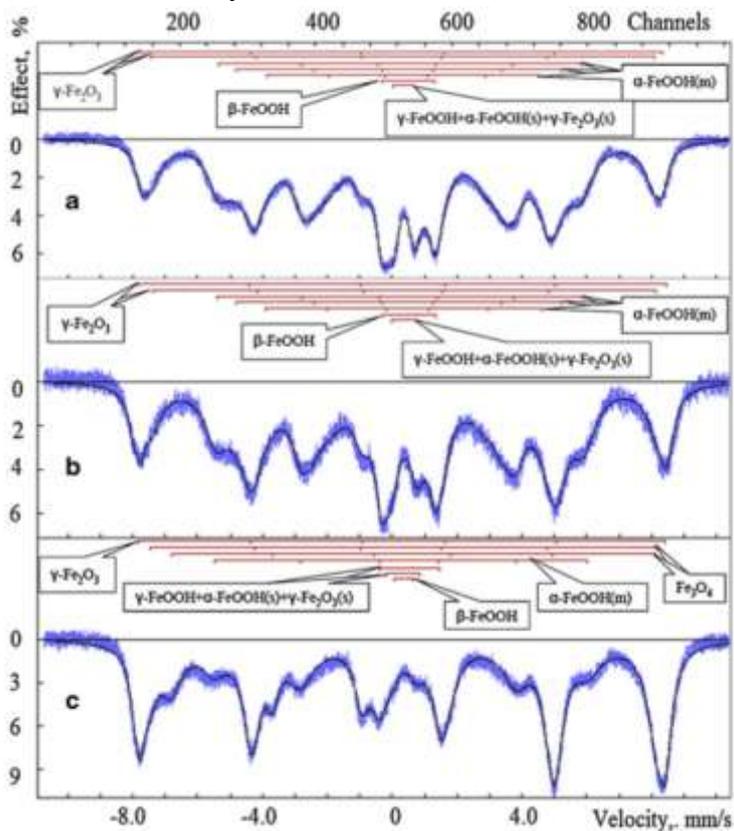


Рис. 3 – Спектры образца, находящегося в контакте с водой: а) поверхность оксидной пленки, б) промежуточный слой оксидной пленки, с) с глубины оксидной пленки

Сравним наши результаты с результатами исследования Д. Кука образцов подверженных длительному воздействию морской воды [4]. На рисунке 4 представлен типичный спектр при комнатной температуре продуктов коррозии, извлеченных из железосодержащих (бронированных) экспонатов времен гражданской войны: военного корабля США Monitor и первой американской подводной лодки CSS Hunley. Анализ спектров показал, что он содержит дублеты акаганеита и лепидокроцита, так же как и магнитную компоненту коррозионного магнетита.

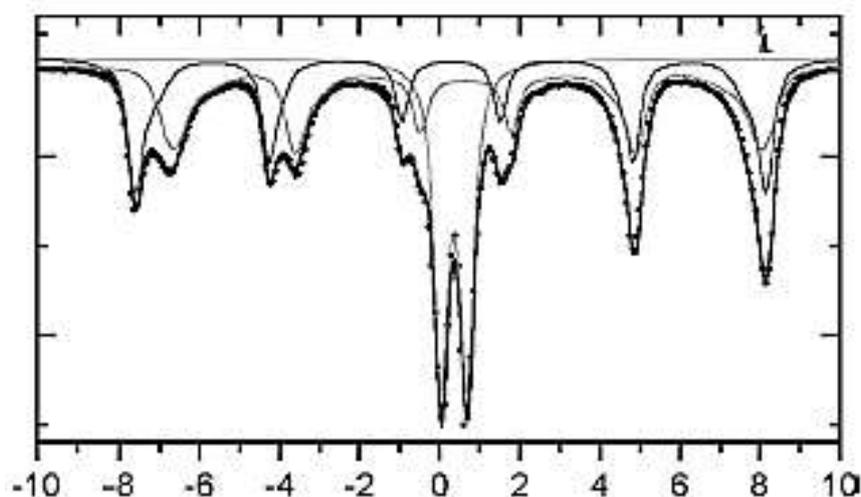


Рис. 4 – Мессбауэровский спектр коррозионного магнетита, сформированного на облицованном железом экспонате времен американской гражданской войны, находившемся в воде в течение 160 лет

Видно, что состав оксидных пленок различных сталей сильно отличается и объяснить это можно как различием в качестве сталей, так и различными условиями их пребывания. Отметим, что Мёссбауэровская спектроскопия оценила различие качественно и количественно.

Выводы и рекомендации

Мессбауэровская спектроскопия способна идентифицировать различные оксиды, образующиеся в результате коррозии стальных конструкций под действием морского климата, и давать количественную оценку их содержания в продуктах коррозии.

Мессбауэровская спектроскопия позволяет проводить послойный анализ и получать информацию о распределении оксидов по толщине оксидной пленки. Можно также оценивать размеры образовавшихся частиц.

Таким образом, метод Мессбауэровской спектроскопии полезен для получения информации о структуре оксидной пленки и ее изменении в процессе коррозии.

Литература

[1]. D.C. Cook, S.J. Oh and H.E. Townsend, The protective layer formed on steels after sixteen years of atmospheric exposure, CORROSION-98, STP 343, NACE International, (1998) 343, pp. 1–11.

[2]. . Cornell, R. M. and Schwertmann, U., The Iron Oxides, Structure, Properties, Occurrence and Uses, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, FRG, 1996, p. 9.

[3]. V. P. Filippov, D. E. Lauer, Yu. A. Lauer, et all, Mössbauer investigation of the influence of the sea atmosphere on the corrosion of steel constructions in Sochi, Hyperfine Interactions (2013) 218, pp.157–162.

[4]. D.C. Cook, Application of Mössbauer Spectroscopy to the Study of Corrosion, Hyperfine Interactions (2004), publication 153, pp. 61–82.

[5]. V. P. Filippov, Yu. A. Lauer, P. G. Goloborodko, A. M. Polyakov, Mössbauer study of oxide phase distributions in rust formed on steel constructions near the Black Sea in Sochi. Hyperfine Interactions (2016) 237, No. 1, Q3, pp. 16–21.

УДК 620.193: 620.197

Практика противокоррозионной защиты изделий авиационной техники разработки «ОКБ Сухого»

Лукьянычев Д.А.¹; Филатов А.А.¹

lukyanychev@gmail.com

¹филиал ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», Москва

Аннотация:

В статье рассмотрены основные способы противокоррозионной защиты изделий авиационной техники разработки «ОКБ Сухого», приведены данные о мероприятиях проведенных на заводах-изготовителях для перехода к всеклиматическому исполнению изделий, оценены затраты трудоемкости необходимые для внедрения усиленной антикоррозионной защиты.

Ключевые слова:

коррозия, биоповреждение, старение, атмосферная коррозия, дефекты, климатические факторы, эксплуатация, авиационная техника, ЛКП.

Введение

«Компания «Сухой» длительное время занимается проблемой обеспечения стойкости деталей и узлов авиационной техники (АТ) к воздействию агрессивных климатических факторов (АКФ), большое внимание уделяется совершенствованию климатического исполнения изделий и систем защиты АТ от АКФ на всех стадиях жизненного цикла.

В процессе эксплуатации на элементы конструкции планера, детали и узлы летательного аппарата (ЛА) наибольшее влияние оказывают следующие климатические факторы: температура, влажность воздуха, солнечная радиация, ветер, песок, осадки и пр. Негативное влияние климатических факторов на детали ЛА и его бортовое оборудование проявляется в виде коррозионных и биологических поражений, старения неметаллических материалов приводящее к потере их физико-механических свойств материалов и отказу оборудования, что требуют значительных финансовых и организационных затрат для их своевременного обнаружения и устранения. Для устранения выявленных в ходе технических осмотров повреждений и дефектов, связанных с влиянием климатических факторов, необходимы значительные финансовые и трудовые затраты, увеличение количества контрольных осмотров или сокращение сроков межрегламентных работ.

Время непосредственного использования ЛА военного назначения при среднегодовом налете около 200 часов, составляет порядка 2–3% от общего календарного срока службы. Остальные 97–98% (8560 ч) времени ЛА находится в режиме предполетной и послеполетной подготовки, в режиме кратковременного хранения. Именно в этот период климатические факторы перечисленные выше имеют наибольшее негативное влияние на коррозионную стойкость ЛА в целом.

Неправильный выбор материалов, схем, методов и средств защиты от негативного воздействия климатических факторов на этапе проектирования, занижение требования к климатическому исполнению планера и в особенности бортового оборудования и покупных комплектующих изделий (ПКИ), приводит к увеличению затрат на послепродажное обслуживание ЛА, что естественным образом сказывается на снижении конкурентоспособности самолетов «Компании «Сухой». Таким образом, для комплексного решения вопроса увеличения

коррозионной стойкости изделий разработки «Компании «Сухой» мероприятия для решения данной задачи должны распространяться на:

- процесс проектирования, т. е. выбор оптимальных конструктивных решений по защите, выбор оптимальных и комплексных систем защиты, выбор соответствующих по коррозионной стойкости материалов;
- процесс сборки – комплекс мер предписанных конструкторской документацией направленных на дополнительную защиту агрегатов ЛА;
- усиление и своевременное исполнение мероприятий в эксплуатации.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 и ОСТ1 90368-86 предусмотрено два варианта климатического исполнения самолета – это общеклиматическое и всеклиматическое исполнение.

Общеклиматическое исполнение (О) – для эксплуатации во всех макроклиматических районах на суше, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом.

Всеклиматическое исполнение (В) – для эксплуатации во всех макроклиматических районах на суше и на море, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом.

При проектировании конструкцию планера условно делят на следующие **категории размещения узлов и деталей (Рисунок 1):**

1. Наружная поверхность изделий (**О1, В1**);
2. Внутренний набор выше подпольного пространства и другие отсеки, где отсутствует скопление конденсата (**О3, В3**);
3. Нижняя часть фюзеляжа, в том числе внутренняя поверхность подпольного пространства, а также другие отсеки, где возможно скопление конденсата (**О5, В5**).

Каждой из приведенных выше категорий размещения узлов и деталей соответствует своя характеристика условий эксплуатации, которые необходимо учитывать при выборе схем защитных покрытий, а

также задаваемых требований по климатической стойкости устанавливаемого бортового оборудования и агрегатов.

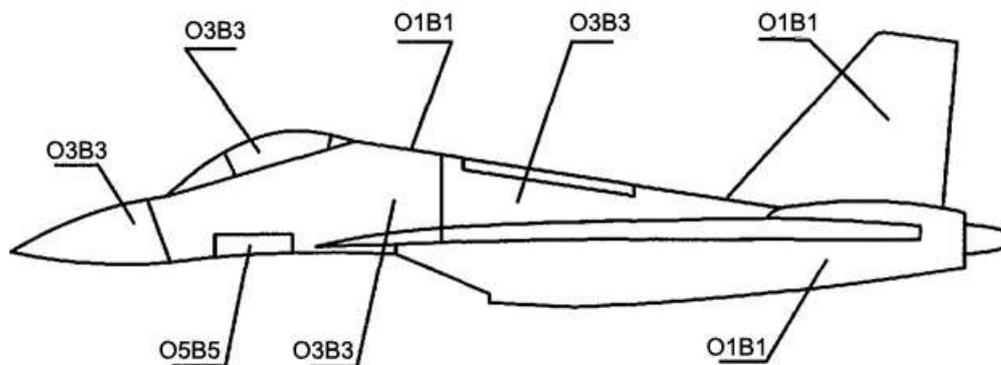


Рис. 1 – Характеристика условий эксплуатации отдельных зон планера, где
O1 – Влажная атмосфера, включая тропическую. Прямое воздействие атмосферных осадков и солнечной радиации.

O3 – Воздушная среда во внутренних отсеках изделий, в том числе выше подпольного пространства, с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий во время стоянок. Среда характеризуется существенным меньшим воздействием солнечной радиации, песка и пыли по сравнению с открытой атмосферой, а также отсутствием прямого воздействия атмосферных осадков и возможности скопления конденсата.

O5 – Возможность скопления конденсата в нижней части фюзеляжа, в том числе в подпольном пространстве изделий, а также в других отсеках изделия.

B1 – Морская атмосфера и периодическое воздействие морской воды, а также прямое воздействие атмосферных осадков и солнечной радиации.

B3 – Воздушная среда во внутренних отсеках изделий при эксплуатации на море или вблизи моря, при отсутствии скопления конденсата, в том числе выше подпольного пространства. Существенное уменьшение воздействия солнечной радиации, песка по сравнению с открытой атмосферой.

B5 – Возможность скопления конденсата с повышенным содержанием хлоридов в нижней части фюзеляжа, в том числе в подпольном пространстве, а также в других отсеках изделий, имеющих сообщение с наружной атмосферой.

Результаты и их обсуждение

В период с 1998 по 2000 г. проведена большая работа по приведению изделий типа «10» (Су-27) в соответствие с требованиями к всеклиматическому исполнению, также были ужесточены требования к ПКИ сторонних разработчиков, применяемых в изделиях «ОКБ Сухого». Изменения производились на основании конструкторской документации "ОКБ Сухого" и утвержденных Решений ФГУП «ВИАМ», "ОКБ Сухого" и представителей Заказчика на этих предприятиях.

Для обеспечения выпуска изделий типа "10" во всеклиматическом исполнении в производстве были проведены следующие мероприятия:

1. Для деталей внутреннего набора из алюминиевых сплавов произведена полная замена грунтовки ФЛ-086 на покрытие грунтовкой ЭП-0215 (система покрытия 400 по ОСТ1 90055-85).
2. Защита головок заклепок, винтов, болтов резьбовых частей с гайками и шайбами внутри изделия, в соединениях не связанных с герметичностью, проводится двумя слоями грунтовки ЭП-0215.
3. Дополнительная защита внутренних поверхностей агрегатов после сборки выполняется одним слоем грунта ЭП-0215 холодной сушки (система 497 ОСТ1 90055-85).
4. Защита от коррозии воздушного канала воздухозаборника проводится грунтовкой АК-070 и эмалью ЭП-140 горячей сушки в деталях и эмалью ЭП-140 холодной сушки после сборки.
5. Сборка стыковых и нахлесточных соединений внешнего контура, а также установка стрингеров и шпангоутов по обшивочным панелям фюзеляжа выполняется на внутришовном герметике. Сборка нижней панели закабинного отсека производится со жгутовым герметиком по стрингерам, шпангоутам и нанесением кистевого герметика по швам.
6. Клепку наружного контура объекта выполняли на сыром грунте ЭП-0215.

7. Окончательная окраска внешней поверхности изделий проводится полиуретановыми эмалями.
8. Для деталей из конструкционных сталей типа 30ХГСА и высокопрочных конструкционных сталей типа 30ХГСН2А система ЛКП на основе эмали ХВ-16 заменена на систему 104 ОСТ1 90055-85, на основе эмали ЭП-140.
9. В зонах особо подверженных коррозии произведена замена сталей типа 30ХГСА и 30ХГСН2А на стали с повышенной коррозионной стойкостью типа 14Х17Н2-В и применен пленкообразующий, водоотталкивающий нефтяной состав НГ-222А.
10. Контрольная проволока с кадмиевым и цинковым покрытием заменена на проволоку из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.
11. На всех изделиях произведена замена деталей из магниевых сплавов на детали выполненные из алюминиевых сплавов.
12. По посадочным неподвижным местам подбалочного кия и стабилизатора произведена замена смазки ЦИАТИМ-201 на смазку ПФМС-4С.

Перечисленные изменения повлекли за собой увеличение трудоемкости за счет:

- сборочно-клепаных работ;
- времени нанесения усиленных систем ЛКП;
- дополнительной защите внутреннего набора планера профилактическими составами;
- постановке люков на гермотиснении;
- установке обшивки на внутришовном герметике;
- замене алюминиевых трубопроводов на стальные.

Выводы

Увеличение трудоемкости при переходе с общеклиматического на всеклиматическое исполнение было оценено в 30%. Проведенные изменения также привели к увеличению веса изделия на 40 кг, что учитывая глобальный характер внедренных изменений не так много. Последующий контроль изделий в эксплуатации и анализ коррозионных поражений показал, что обнаруженные дефекты, которые все-таки встречаются, носят поверхностный характер и не представляют опасность для дальнейшей эксплуатации объектов.

В настоящее время мероприятия по усилению коррозионной защиты планера и их современное развитие, скорректированное постоянными работами по контролю изделий в эксплуатации, легли в основу СТП 04.137-2016 «Антикоррозионная защита изделий, изготавливаемых во всеклиматическом исполнении», который существенно дополняет требования ОСТ1 90368-86 и расширяет возможности по противокоррозионной защите изделий АТ.

УДК 66.018.8

Комбинированные технологии получения износостойких и коррозионностойких покрытий на алюминии и его сплавах для изделий авиационной и морской техники, как альтернатива анодированию

Марков М.А.¹, к.т.н.; Кузнецов Ю.А.², д.т.н.;

Красиков А.В.¹, к.т.н.; Быкова А.Д.¹, Макаров А.М.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»

²ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»

Аннотация:

Представлены результаты коррозионных испытаний алюминия с защитными керамическими покрытиями.

Ключевые слова:

алюминий, коррозионная стойкость

Введение

Конструкционная керамика на основе Al_2O_3 обладает высокими прочностными свойствами и устойчивостью к коррозии в агрессивных химических средах. Практический опыт показывает, что алюмооксидные керамические материалы демонстрируют эффективную работу в контактных узлах ответственных деталей, эксплуатируемых в машиностроении, морской и авиационной технике [1].

Существующие технологические подходы изготовления алюмооксидных керамических материалов основаны на прессовании и

спекании смеси керамических порошков в монолитное изделие, однако такой процесс, с учетом стоимости исходных материалов, является дорогостоящим. [2]. Более рациональным и экономичным подходом выглядит использование защитных керамических покрытий на металлических изделиях.

В работе рассмотрены комбинационные технологические приемы получения новых керамических покрытий на основе Al_2O_3 на алюминиевых сплавах, в соответствии с которыми «холодным» газодинамическим напылением (ХГДН) формируется алюминиевое покрытие, которое подвергается микродуговому оксидированию (МДО), в результате чего образуется износостойкое и коррозионностойкое композиционное керамическое покрытие с переходным алюминиевым слоем к металлу, также рассмотрен способ упрочнения разрабатываемых покрытий.

Цель работы – исследование формирования износостойких и коррозионностойких покрытий на алюминиевых сплавах за счет комплексного использования методов низкотемпературного гетерофазного переноса, микродугового оксидирования, магнетронного распыления, оценка трибологических и антикоррозионных свойств полученных покрытий.

Объект и методика исследований

Для получения покрытий в качестве основы использовали образцы размером $50 \times 20 \times 3$ мм, изготовленные из алюминиевых сплавов АМг2, АК7ч, А5 (технически «чистый» алюминий).

Для проведения ХГДН был использован алюминиевый порошок марки А-80-13 с добавлением 40% масс. порошка корунда (технологическая добавка) марки 25А зернистостью F360.

Порошок измельчали и просеивали с целью выделения необходимой для напыления фракции 10–60 мкм.

Холодное газодинамическое напыление осуществляли на установке «Димет-403». Сущность данного процесса заключается в том, что частицы разгоняются до высокой скорости, благодаря сверхзвуковому потоку воздуха, вследствие чего они осаждаются из-за интенсивной пластической деформации при ударе в твердом состоянии и при температуре, значительно ниже температуры плавления распыляемого материала [3–6].

После нанесения покрытия ХГДН и соответствующей механической обработки, проводили микродуговое оксидирование. При пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит создаются условия, когда на поверхности металла возникают микроплазменные разряды с высокими локальными температурами. Результатом действия разрядов в условиях интенсивного теплоотвода в электролит является формирование тонкослойного оксидно-керамического покрытия [7]. МДО осуществляли на установке ИПТ-1000.

Источник питания установки позволяет подавать на ванну ток силой до 100 А при напряжении до 1000 В и изменять ток в ванне посредством включения дополнительных емкостей, что в каждом конкретном случае обеспечивает стабильное протекание МДО и создание оксидно-керамического слоя.

В качестве рабочего раствора при МДО использовали электролит силикатно-щелочной, состав: гидроксид калия – 2 г/л; жидкое стекло – 8 г/л, остальное – вода. Продолжительность МДО составляла 1,5 час в анодно-катодном режиме при плотности переменного тока 13–15 А/дм²;

Магнетронное распыление осуществляли на установке «Магна ТМ5». Принцип метода заключается в катодном распылении мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещенных полях.

Дисперсность порошковых материалов измерялась методом лазерного дифракционного анализа с помощью прибора Malvern Mastersizer 2000.

Морфологию и элементный состав частиц порошков и покрытий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на исследовательском комплексе «TESCAN Vega».

Фазовый состав покрытий изучали на рентгеновском дифрактометре «D8 Advance» фирмы Bruker (Германия).

Для оценки износостойкости покрытий использовали машину трения «MTU-1» по схеме «вращающиеся пальчики из стали 18ХГТ – неподвижный диск с покрытием». Площадь контакта составляла $1,5 \text{ см}^2$, продолжительность испытаний – 20 часов, нагрузка – 1,5 МПа при частоте вращения 580 мин^{-1} .

Коррозионные испытания образцов с покрытиями на алюминиевых сплавах проводили в водном 5%-ном растворе гидроксида натрия.

Коррозионные испытания образцов с покрытиями на стали проводили в соответствии с ГОСТ 9.308-85 в 5%-ном растворе хлорида натрия (соляной туман).

Результаты исследований

На поверхности алюминиевых образцов порошковым материалом А-80-13 были сформированы алюминиевые покрытия толщиной $h=200$ мкм. Упрочнение поверхности микродуговым оксидированием в силикатно-щелочном электролите привело к формированию внешнего композиционного керамического слоя, при этом толщина переходного алюминиевого слоя к основе составила $h \approx 70$ мкм. Фазовый состав оксидно-керамического слоя представлен основной тугоплавкой и термически стойкой фазой муллита сложного стехиометрического состава, обладающего некоторой пластичностью, по сравнению с оксидом алюминия, а так же незначительным содержанием α -, η - Al_2O_3 и аморфной фазы SiO_2 . Вероятно, поэтому на поверхности образцов образовался рыхлый технологический слой [8].

На рис. 1 показаны результаты износа покрытий и образцов-свидетелей в ходе трибологических испытаний. В табл.1 приведены данные по скорости изнашивания сравниваемых пар трения.

Установлено, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1...3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2...2,5 раза выше износостойкости алюминиевого сплава АК7ч, принятого за эталон сравнения [9, 10]. Следует отметить, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий несколько ниже износостойкости оксидно-керамических покрытий, полученных на алюминиевых сплавах.

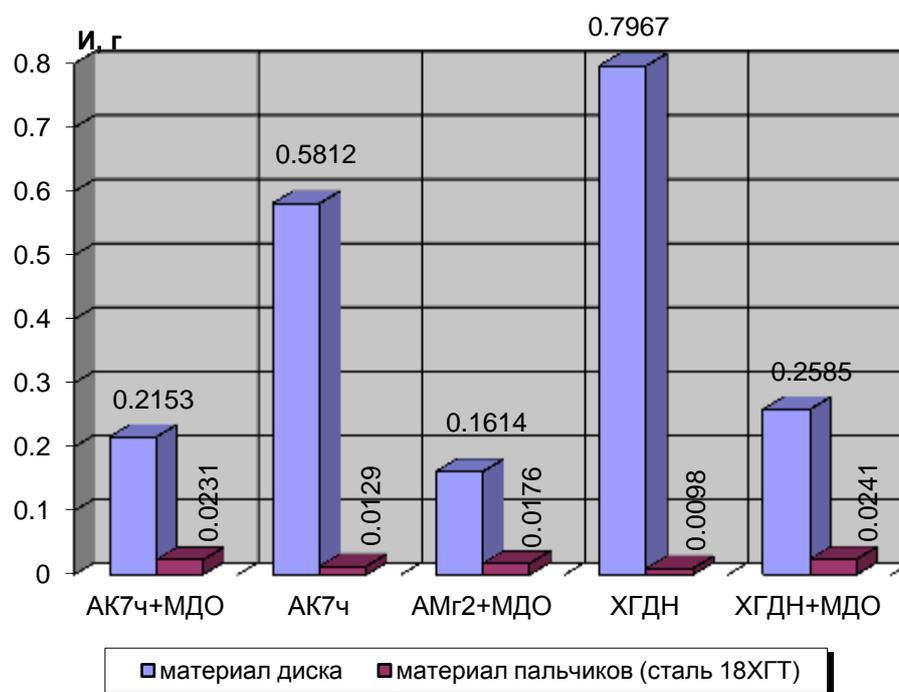


Рис. 1 – Результаты трибологических испытаний пар трения «диск-пальчики»

Оценка скорости изнашивания пар трения

Испытываемый материал	Скорость изнашивания пары трения, г/ч
АК7ч+МДО	0,0119
АК7ч	0,0297
АМг2+МДО	0,0089
Покрытие ХГДН	0,0403
Покрытие ХГДН+МДО	0,0141

Далее, на основе анализа работ [11, 12] были рассмотрены технологические аспекты возможности получения тонких фторопластовых пленок на МДО-покрытиях методом магнетронного распыления. В ходе предварительных экспериментов пленки формировали на плоских полированных кремниевых пластинах, с последующим напылением титанового покрытия. На рисунке 2 представлен скол кремниевой пластины в поперечном сечении, на котором можно отчетливо наблюдать равномерную прослойку из фторопласта толщиной $h = 1$ мкм, что дополнительно подтверждается данными энергодисперсионного анализа. Аналогичная толщина фторопласта была сформирована на МДО-покрытиях. Следует отметить, что визуализация пленки микроскопическим методом непосредственно в поперечном сечении МДО-покрытия весьма затруднительна, ввиду ее малой толщины и высокой способностью фторопласта к истиранию в процессе изготовления и полировки металлографического шлифа.

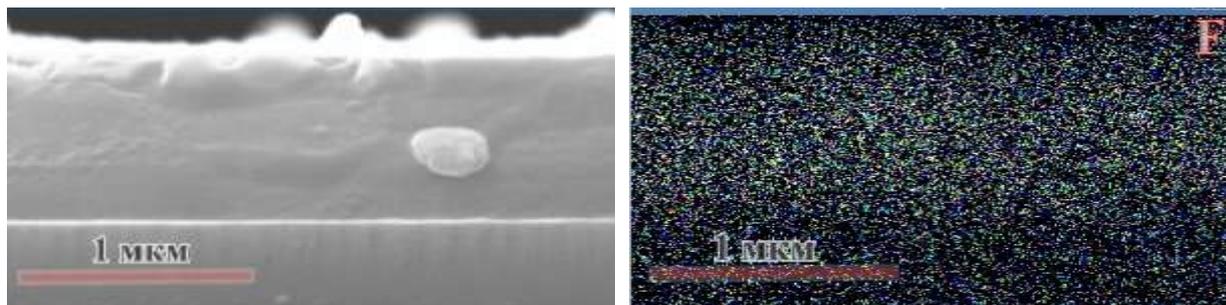


Рис. 2 – Формирование пленки из фторопласта методом магнетронного распыления:
а) Общий вид пленки на кремниевой пластине; б) Распределение элементов в толщине пленки по фтору, тепловая карта

На рисунке 3 приведены результаты коррозионных испытаний «технически чистого» алюминия А5 без покрытия, а так же с композиционными защитными покрытиями. В щелочной среде наблюдается интенсивное растворение алюминия. Наличие МДО-покрытия существенно тормозит развитие коррозии. Можно предположить, что взаимодействие щелочи с алюминием осуществляется через поровые каналы оксидного слоя. Результатом становится медленное вытравливание алюминия и нарушение адгезионной границы ХГДН-МДО, вследствие чего через 3 часа коррозионных испытаний происходит расслоение и разрушение оксидно-керамического покрытия. Наилучшие результаты демонстрирует МДО-покрытие с пленкой фторопласта, который заполняет открытые поры оксидных слоев и уменьшает зону взаимодействия алюминия со щелочью.

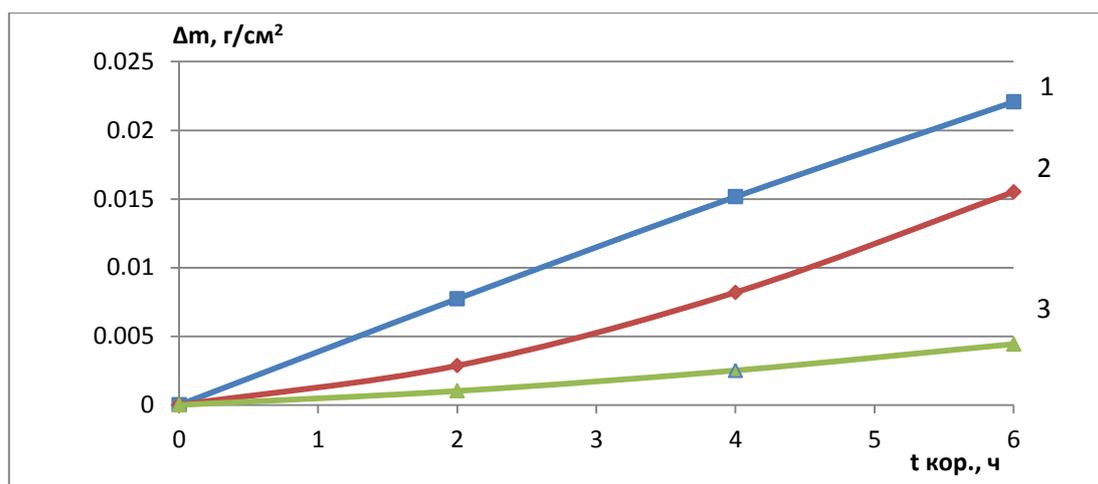


Рис. 3 – Зависимость потери массы образцов алюминиевого сплава А5 от продолжительности коррозионных испытаний в щелочной среде:
1 – без покрытия; 2 –ХГДН и МДО; 3 – ХГДН, МДО и фторопластовая пленка

Сравнительные коррозионные испытания коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т с МДО-покрытием и без него (рис. 4) показали, что скорость коррозии образцов с МДО-покрытиями составляет около 170 г/м²*год, а коррозионностойкой стали около 250 г/м²*год.

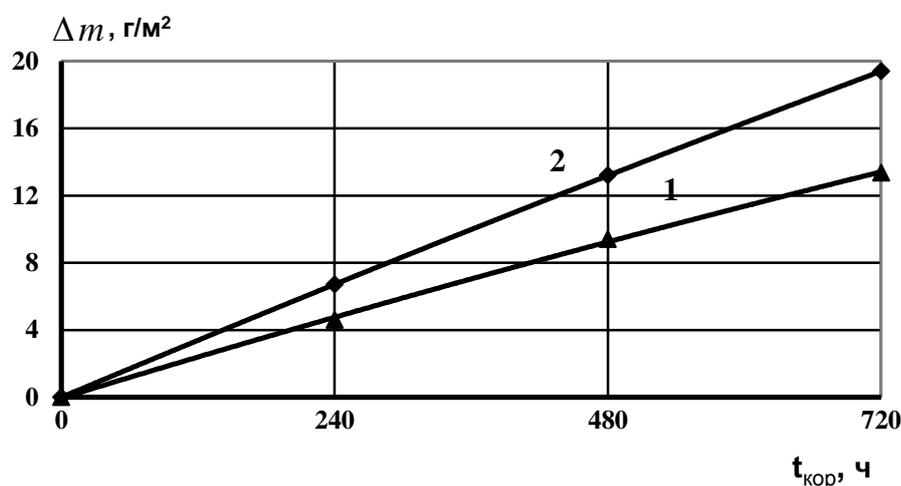


Рис. 4 – Зависимость потери массы образцов коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т от продолжительности коррозионных испытаний в «соляном тумане»:
1 – ХГДН+МДО; 2 – без покрытия

Выводы

1. Износостойкость упрочненных микродуговым оксидированием алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1...3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2...2,5 раз выше износостойкости алюминиевых сплавов.

2. Микродуговая обработка алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением приводит к повышению антикоррозионных свойств алюминиевых сплавов в щелочной среде. Дополнительная коррозионная защита обеспечивается формированием пленки фторопласта толщиной $h=1$ мкм методом магнетронного распыления на поверхности оксидно-керамического покрытия. Использование подобных покрытий также увеличивает антикоррозионные свойства коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по направлению «Проведение инициативных исследований молодыми учеными Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными» (проект № 18-73-00025).

Литература

1. Солнцев Ю.П. Материаловедение / Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф. / М. Изд. МИСИС. 1999, 600 с.
2. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения / Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. // М.: Научтехлитиздат, 2003. — 384 с.
3. Алхимов А. П. Холодное газодинамическое напыление / Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. // Новосибирск: Физматлит, 2010. 536 с.

4. Аввакумов М. Е. Надежность и качество покрытия при использовании метода «холодного» газодинамического напыления / Аввакумов М. Е., Руфицкий М. В. // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 2.

5. Алхимов А.П. Метод «холодного» газодинамического напыления / Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. // ДАН СССР, т. 315,1990. - С. 1062–1065.

6. Геращенко Д. А. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий / Геращенко Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Машек А. Ч. // Вопросы материаловедения. – 2014. – №1(77) . – С. 87–97.

7. Новиков А.Н. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием / Новиков А.Н., Батищев А.Н., Кузнецов Ю.А., Коломейченко А.В. // Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2001. 99 с.

8. Кузнецов Ю.А. Особенности механической обработки оксидно-керамических покрытий, полученных плазменно-электролитическим оксидированием / Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н., Гончаренко В.В. Глинский М.А. // Технология металлов. 2017. № 10. С. 18–24.

9. Кузнецов Ю.А. Моделирование изнашивания МДО-покрытий / Кузнецов Ю.А., Гончаренко В.В., Ферябков А.В. // Техника и оборудование для села. 2015. №9. С. 40–44.

10. Кузнецов Ю. А. Исследование адгезионной прочности покрытий, полученных комбинированным способом / Кузнецов Ю. А. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 7.– 2005.– С. 32–33.

11. Dhananjay S. Bodas Deposition of PTFE thin films by RF plasma sputtering on $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ silicon substrates / Dhananjay S. Bodas, A.B. Mandale,

S.A. Gangal // Applied Surface Science Volume 245, Issues 1–4, 30 May 2005, Pages 202–207.

12. Grytsenko K.P., Protective applications of vacuum-deposited perfluoropolymer films / Grytsenko K.P., Kolomzarov Y.V., Belyaev O.E., S. Schrader // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2016. V. 19, N 2. P. 139–148.

УДК 620.1

От оценки климатической стойкости материалов к климатическому исполнению изделий авиационной техники военного назначения

Прокопенко А.Н.¹; Бакшаев С.И.²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), г. Москва

²Научный исследовательский центр Центрального научного исследовательского института ВВС МО РФ, г. Люберцы

Аннотация:

Дано определение понятию «климатическая стойкость» с точки зрения разработчика материалов. Показаны недостатки нормативной документации по проблеме коррозии, старения и биоповреждений требующих актуализации. Проведен анализ первой редакции ГОСТ «Общие требования к составу и содержанию документов для оценки климатического исполнения» внедрение которого направлено на повышение климатической стойкости изделий военной техники эксплуатируемых в различных климатических районах.

Ключевые слова:

климатическая стойкость, климатическое исполнение изделий, внешние воздействующие факторы.

Для обеспечения безопасной эксплуатации авиационной техники военного назначения в назначенные сроки службы предъявляются жесткие требования к стабильности служебных характеристик материалов и

функциональных покрытий, используемых в изделии при эксплуатации в различных климатических районах [1–12].

Требования по надежности авиационной техники и обеспечения ресурса конструкции отражены в Авиационных Правилах (АП части 23, 25, параграф 603,609), согласно которым одним из важнейших критериев, по которым проводится выбор материалов, является их стойкость к воздействию климатических факторов. Авторы многих исследований в области влияния климатических факторов на материалы и изделия в своих публикациях и докладах довольно часто употребляют такой термин как «климатическая стойкость». Однако необходимо констатировать тот факт, что в настоящий момент в нормативно-технических документах отсутствует стандартизированное понятие (определение) «климатическая стойкость» [2]. Вследствие чего разработчики материалов, конструкторы, изготовители и эксплуатанты авиационной техники (АТ) вкладывают в смысл этого термина разные как, по сути, так и по содержанию понятия. Для разработчиков материалов «климатическая стойкость», это, прежде всего влияние климатических факторов на изменение служебных характеристик материала при проведении ускоренных и натурных испытаний. Для конструктора «климатическая стойкость» – это один из показателей долговечности и сохраняемости конструкции изделия или составного элемента (блока). Для изготовителя авиационной техники, это серийное производство изделия в соответствии с требованиями нормативной документации и соблюдение технологических процессов. Для эксплуатанта понятие «климатическая стойкость», это, прежде всего отсутствие повреждений, отказов и неисправностей конструкции планера и систем при эксплуатации АТ в различных климатических районах [1–4].

Итак, дадим определение, что такое «климатическая стойкость» с точки зрения материалововеда – это свойство материала или покрытия сохранять свои служебные (физико-механические и др.) характеристики в

течение заданного срока при совместном воздействии климатических и тепло-влажностных эксплуатационных воздействующих факторов.

С этой позиции ФГУП «ВИАМ» как разработчик материалов и покрытий для ВВСТ в настоящий момент имеет полный комплекс современного лабораторного оборудования и, что очень важно компетентных специалистов по определению климатической стойкости материалов, как в лабораторных, так и в натуральных условиях. Исследования выполняются в рамках реализации комплексного научного направления 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 3].

Основными критериями определения климатической стойкости материалов, являются данные, получаемые в результате проведения лабораторных и натуральных климатических испытаний. Результаты лабораторных испытаний материалов в климатических камерах, в которых отсутствует возможность моделирования воздействия всей совокупности климатических факторов, рассматриваются как оценочные и должны корректироваться результатами, полученными при проведении натуральных испытаний [5–14].

В связи с этим, работы по изучению климатической стойкости материалов и покрытий проводятся по следующим направлениям:

– исследования климатической стойкости материалов в лабораторных условиях и в различных климатических зонах России и земного шара с целью получения дополнительных данных для включения в паспорта на разработанные в ВИАМ материалы;

– исследование влияния климатических факторов на структуру и механические свойства материалов;

– применение новых методов для исследования изменения структуры материалов;

- разработка новой и актуализация имеющейся нормативной документации на проведение климатических испытаний;
- совершенствование экспериментальной базы проведения климатических испытаний материалов [1–4, 12, 24].

Анализ нормативно-технической документации по проведению лабораторных испытаний материалов в области коррозионной стойкости, старения и биоповреждений показал, что основой проводимых испытаний является нормативная база, разработанная в 70-80х годах прошлого столетия к настоящему моменту требует актуализации и дополнений по некоторым направлениям испытаний. Так зафиксировано, что при проведении испытаний в натуральных условиях поверхность материала при воздействии солнечного излучения подвержена перегреву по отношению к температуре окружающей среды на 40–60°C, что не как не учитывается при прогнозировании изменения служебных характеристик материалов [6].

Проблемным вопросом является разночтение требований нормативных документов в части воздействия климатических факторов. Так в пункте 1.2 ГОСТ-15150-69 говорится «Изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных техническими заданиями, стандартами или техническими условиями в течение сроков службы и сроков сохраняемости, указанных в технических заданиях, стандартах или технических условиях, после и (или) в процессе воздействия климатических факторов» [25]. Однако в пункте 1.2 ОСТ 1 90368-86 разработанного с учетом требований ГОСТ-15150 указано «Изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных стандартами и техническими требованиями в течение гарантийных сроков эксплуатации в процессе воздействия климатических факторов» [26]. Срок службы самолета поколения 4++ составляет 25 лет, а гарантийный срок 1–2 года. Получается, что требования ОСТ 1 90368 в части защиты изделия

от воздействия климатических факторов внешней среды не соответствуют требованиям вышестоящего нормативного документа.

Необходима разработка стандартизированных подходов к проведению испытаний неметаллических материалов применяемых в авиационной технике при совместном воздействии климатических внешних воздействующих факторов (ВВФ) и различных видов нагрузок, что на текущий момент не как не регламентирована. Этот вопрос особенно актуален для композиционных полимерных материалов [14–23].

В соответствии с градацией по ГОСТ-26883 внешние воздействующие факторы (ВВФ) делятся на 6 основных групп:

- механические;
- климатические;
- биологические;
- термические;
- специальные среды;
- электромагнитные поля [27].

Нас из этой группы интересуют климатические факторы, к которым относятся: атмосферные осадки, морской туман, коррозионная активность воды, почвы и воздуха, тепловой износ, атмосферное давление, солнечное излучение.

Согласно ГОСТ-26883 понятие «стойкость изделия к ВВФ» – это свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время и после действия на изделие определенного ВВФ в течение всего срока службы в пределах заданных значений. Ключевым словом в этом определении является действие на изделие определенного ВВФ, т.е. мы проводим испытания только по одному из группы факторов, без учета их совместного действия. Трудно представить себе изделие АТ, на который действует только один из факторов в условиях эксплуатации. Природа ряда ВВФ такова, что оценка их влияния на материал или изделие как одиночного ВВФ без учета одновременного действия других ВВФ не

имеет смысла. Так, оценка действия относительной влажности воздуха для климатического класса ВВФ не может быть проведена без рассмотрения одновременного действия таких факторов как температура или солнечное излучение.

Климатической стойкости АТ это комплекс мероприятий, осуществляемый на всех этапах жизненного цикла: разработка и квалификация материала, проектирование, изготовление, эксплуатация.

На рис. 1 приведена блок-схема этапов жизненного цикла и их взаимосвязи в области климатической квалификации. Красным цветом выделены блоки, которые в настоящий момент не как не регламентированы с точки зрения нормативной документации.

Отсутствие данных о климатической стойкости, несоответствие систем защиты, ошибки, просчеты, заложенные в конструкции планера при проектировании, не соблюдение требований производственных инструкций при изготовлении, и не выполнение требований регламентных работ в эксплуатации все это звенья одной цепи под названием климатическая стойкость и нарушение хотя бы одного из звеньев сводит на нет работу остальных.

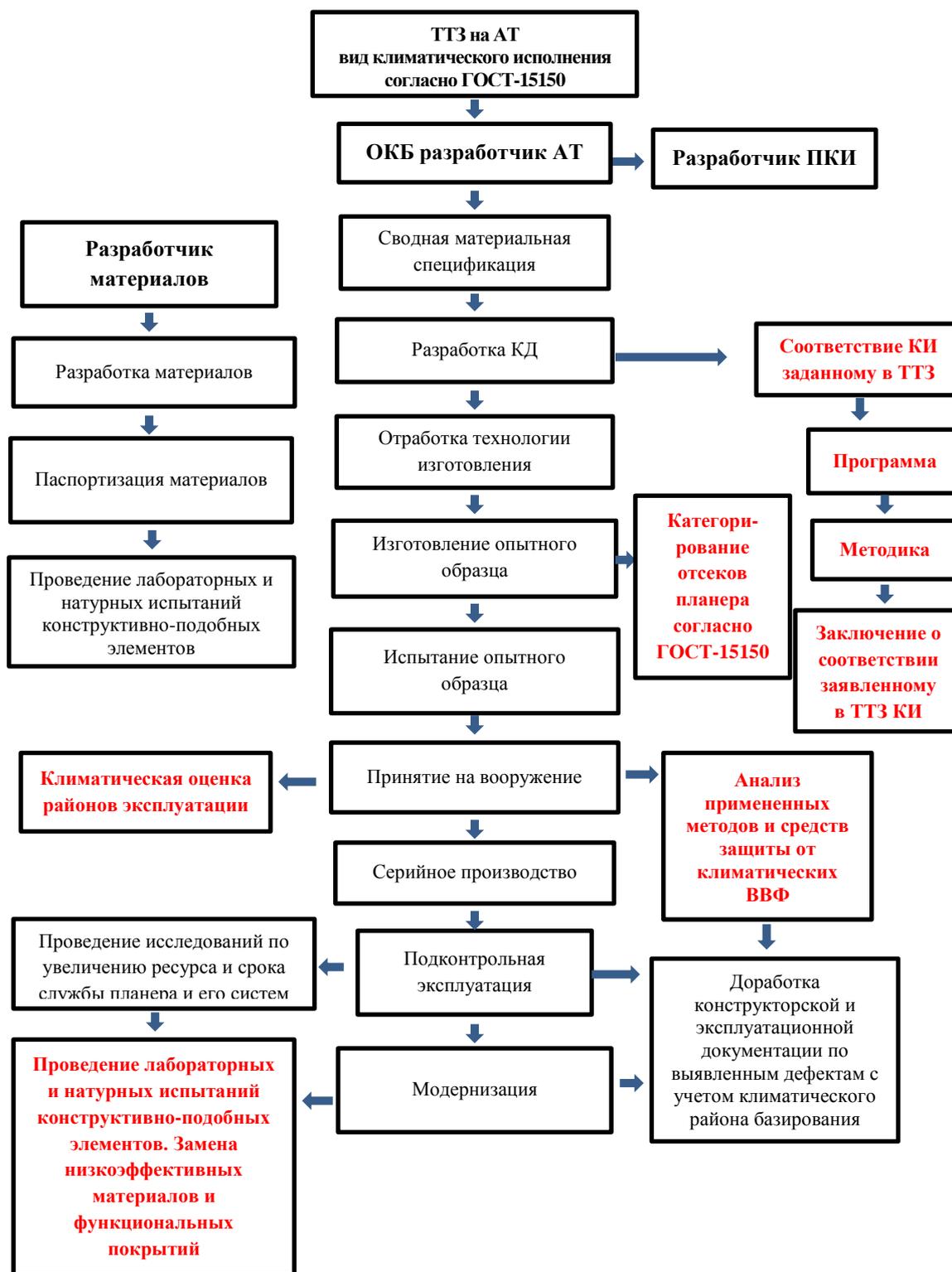


Рис. 1 – Блок-схема комплекса мероприятий направленных на повышение климатической стойкости изделий АТ на этапах жизненного цикла

Ниже на рис. 2 и 3 приведены примеры ошибок, допущенные при проектировании АТ которые проявились в эксплуатации.

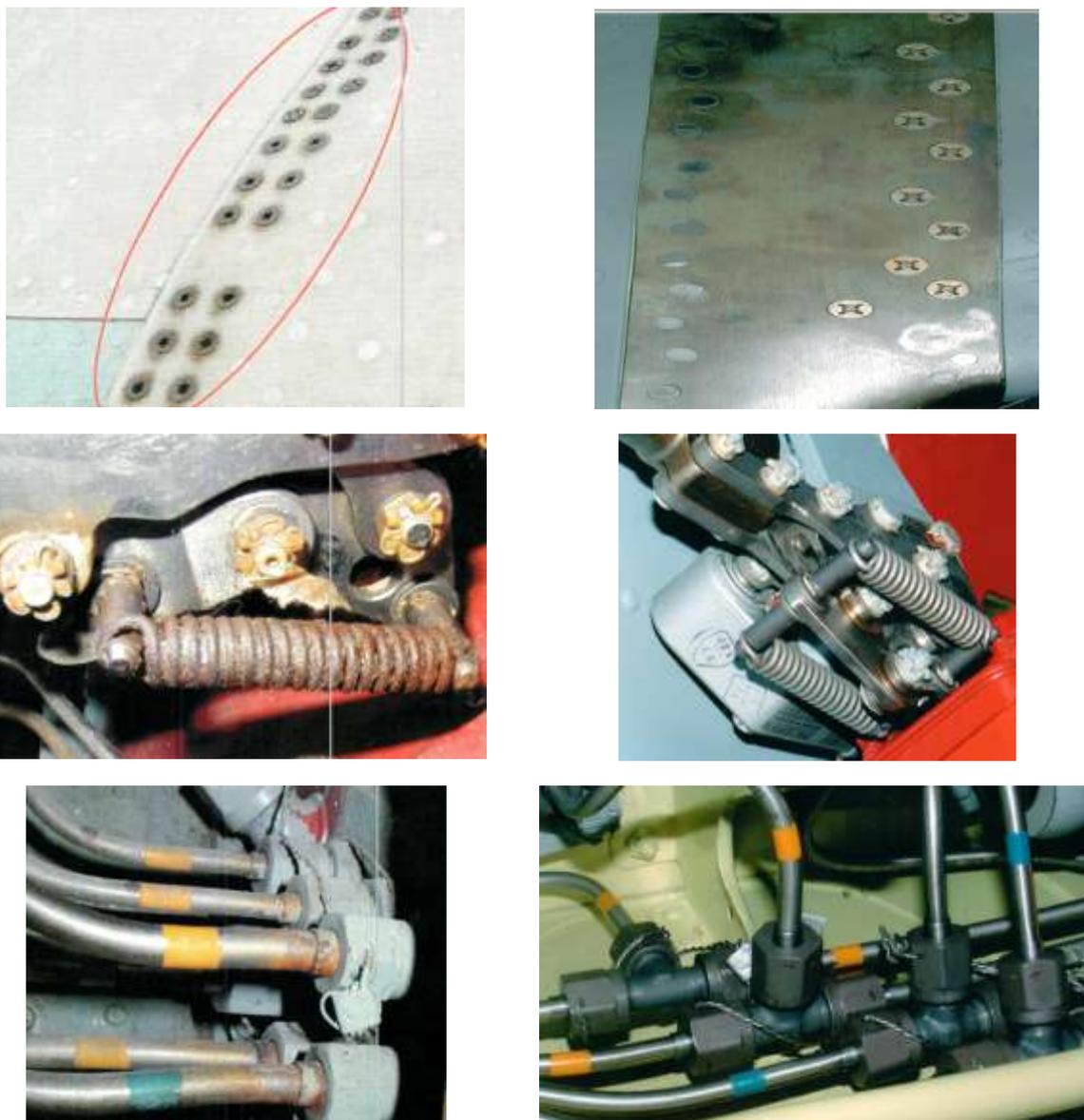


Рис. 2 – Повреждения деталей авиационной техники, вызванные влиянием климатических факторов

На рис. 2 и 3 видно, что даже минимальные ошибки при изготовлении и проектировании приводят к резкому усилению коррозии и ослаблению конструкции, что при эксплуатации ВС может иметь катастрофические последствия.

Немаловажным является и выполнении требований Руководств по эксплуатации в части профилактики и снижения неблагоприятного воздействия климатических ВВФ в условиях эксплуатации. И здесь есть над чем работать. Анализ эксплуатационной документации показал, что

некоторые разделы Руководств содержат общие фразы по устранению и профилактики коррозии, а также не учитывают климатические особенности районов эксплуатации. Во многих Руководствах не прописано использование средств временной противокоррозионной защиты такие как «ПИНС-АТ» показавшие свою высокую эффективность. Выполнение некоторых требований не регламентировано по периодичности и не учитывает особенности районов эксплуатации.

На рис. 3 приведены примеры ошибок, допущенные при производстве АТ.

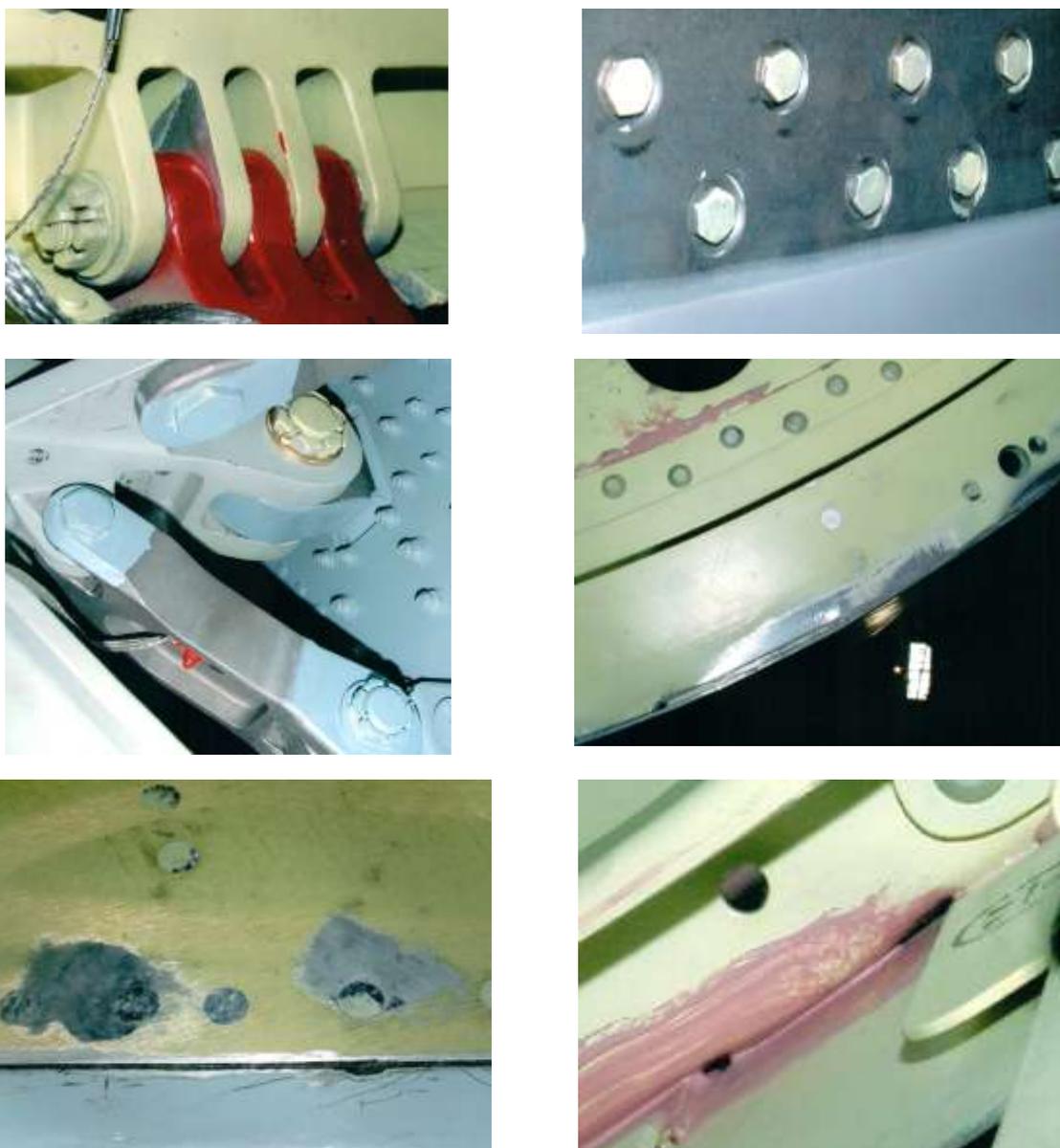


Рис. 3 – Нарушение требований технологических инструкций при изготовлении

В тоже время разработчики материалов лишены информации о работе материалов и функциональных покрытий в изделиях АТ в период эксплуатации. Выстроена сложная, а порой и непреодолимая, система сбора и анализа информации по повреждаемости материалов и отказам узлов и агрегатов, связанным с влиянием климатических ВВФ.

Анализ современной ситуации и состояния дел в вопросах обеспечения сохраняемости свойств авиационных материалов показал, что самым важным вектором усилий материаловедов должно стать не только изучение и разработка способов противодействия процессам коррозии, старения и биоповреждения материалов и технических изделий, но и создание государственной системы мониторинга, менеджмента и кадровой политики по созданию профессии – инженер коррозионист.

Потери от коррозии, по оценкам экспертов составляют от 2 до 5% ВВП развитых государств. Приблизительные потери от коррозии, старения и биоповреждения в РФ составляют свыше 100 млрд рублей в год.

В целевых Государственных программах РФ не учитывается фактор влияния климата, а ряд программ невозможно выполнить без своевременного и научно-обоснованного повсеместного внедрения систем рационального конструирования и соблюдения правил защиты материалов от коррозии, старения и биоповреждения.

Отсутствуют целевые Государственные программы, предусматривающие мониторинг климатических факторов, агрессивности атмосферы и анализ потерь от разрушения, простоя, потери работоспособности сложных технических систем и инфраструктуры на территории Российской Федерации.

Необходимо напомнить, что до 2000 года в Министерстве обороны существовал Координационный научный совет МО РФ по проблемам хранения, стойкости ВВТ к воздействию климатических и биологических факторов и защите от коррозии, старения и биоповреждений. Отсутствие

обмена информацией между научными организациями, промышленностью и разработчиками военной техники (ВТ) снижает уровень научных исследований и разработок.

Переходя к климатическому исполнению изделий АТ хочется отметить то, что само определение понятия «климатическое исполнение» появилось в изменении №5 ГОСТ-15150-69 и вступило в силу только 01.01.2013 г. Анализируя данное определение необходимо отметить, что в нем учитываются только совокупности конструкционных и технологических мероприятий обеспечивающих возможности применения изделий в конкретных макроклиматических районах земного шара.

В определении не принимается во внимание служебные характеристики материалов, из которых изготовлено изделие и не установлены сроки применения изделий.

Поэтому предлагаем своё определение понятия «климатическое исполнение» изделия – это совокупность служебных характеристик материалов, конструкционных и технологических мероприятий, обеспечивающих эксплуатацию изделия и его встроенных элементов в установленные сроки службы и назначенный ресурс в заданном макроклиматическом районе земного шара.

В соответствии с требованиями ОТТ 1.1.6 и ГОСТ 15150 в ТТЗ (ТЗ) на опытно конструкторские работы (ОКР) для каждого изделия ВТ задается климатическое исполнение. Анализируя содержание ГОСТ-15150 необходимо отметить, что в настоящий момент нет нормативных и методических документов определения соответствия изделия АТ заданному в Тактико-Техническому Заданию (ТТЗ) климатическому исполнению. Проще говоря, соответствует ли изделие АТ по совокупности выбранных материалов, конструктивным и технологическим подходам заданному климатическому исполнению. В этом году ФГУП «Рособоронстандарт» разработал ГОСТ «Общие требования к составу и

содержанию документов для оценки климатического исполнения». Настоящий стандарт распространяется на изделия военной техники на стадии жизненного цикла «Разработка» и устанавливает общие требования к составу и содержанию документов представляемых для оценки климатического исполнения.

Данный стандарт предполагает проведение комплекса процедур для определения соответствия климатического исполнения изделия ВТ заданному в ТТЗ с подготовкой Заключения. Оценка соответствия климатического исполнения изделий ВТ проводится по документам, представляемым организациями-разработчиками, отвечающими за достоверность содержащихся в них данных на этапе «Разработка» образца ВТ.

В ходе работ по оценке соответствия климатического исполнения изделий ВТ предлагается проведение следующего комплекса работ:

- оценка климатической стойкости конструкционных материалов, применяемых на изделиях ВТ;
- оценка совместимости контактов разнородных металлов и неметаллических материалов;
- оценка неметаллических, горюче-смазочных материалов, специальных жидкостей, применяемых на изделиях ВТ и их стойкости к старению и биоповреждениям;
- оценка методов и средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений;
- оценка проведенных мероприятий по влагозащищенности изделий;
- оценка конструктивных и эксплуатационных решений, принятых при создании изделий ВТ для повышения климатической стойкости;
- оценка эксплуатационной документации, эффективности программ технического обслуживания изделий ВТ по предупреждению, выявлению

и устранению коррозионных, биологических повреждений и повреждений из-за старения материалов;

– оценка стойкости изделий ВТ и комплектующих изделий к воздействию климатических факторов.

Разработка и внедрение вышеуказанного ГОСТ это начало построения системы по оценки соответствия климатического исполнения изделий заданным в ТТЗ требованиям, внедрение которого направлено на повышение климатической стойкости изделий эксплуатируемых в различных климатических районах, обеспечение заданных показателей надежности. Данный ГОСТ должен стать базой по созданию системы оценки климатического исполнения военной техники. Необходимо будет разработать целый комплекс программ и методик оценки в зависимости от типа и вида вооружения.

Выводы:

1. Дано определение «климатической стойкости» материала с точки зрения разработчика материалов.

2. Необходимо продолжить работы по актуализации нормативно-технической базы в части климатических испытаний в области защиты изделий авиационной техники военного назначения от коррозии, старения и биоповреждений, разработать «дорожную карту» с определением конкретных направлений и сроков выполнения работ;

3. Анализ первой редакции ГОСТ по оценке климатического исполнения изделий АТ военного назначения показал, актуальность и необходимость разработки целого пакета нормативных документов по данному направлению.

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. С. 76–87.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 8. С. 7–17.
4. Гриневич А.В., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Скрипачёв С.Ю. ПРОБЛЕМНЫЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЁТНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. В сборнике: IX Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат" посвящена 110-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Николая Митрофановича Склярова: материалы конференции. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. 2017. С. 16.
5. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 2 «Обоснование выбора режимов и проведение теплового старения полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы» // Труды ВИАМ. 2016. №1. Ст. 10 (viam-works.ru).
6. Николаев Е.В., Коренькова Т.Г., Шведкова А.К., Валева Е.О. Исследование влияния температурных факторов на процесс старения

новых полимерных композиционных материалов для мотогондолы авиационного двигателя //Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 12.URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2017).

7. Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П., Барботько С.Л. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11.

8. 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.

9. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. №3–4. С. 58–64.

10. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. №3–4. С. 58–64.

11. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 66–72.

12. Кириллов В.Н. Старцев О.В. Ефимов В.А. «Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения». В сб. докл.

13. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // Пластические массы. 2016. № 3-4. С. 58–64.

14. Лаптев А.Б., Перов Н.С., Бухарев Г.М., Кривушина А.А. Основные организмы биодеструкторы конструкционных материалов в водных средах. В сборнике: Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». Сборник докладов III Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «ВИАМ». 2016. С. 19.

15. Применение конструкционных металлических материалов и определение их расчетных характеристик: рекомендательный циркуляр №РЦ-АП25-613: утв. Решением Президиума Авиарегистра МАК 22.11.2002; М.: Авиаиздат, 2008 г. 21 с.

16. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Стандартизация климатической квалификации изделий // Стандарты и качество. 2016. № 11. С. 82–85.

17. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом климате. Дисс. ...докт. техн. наук. –М.1990.

18. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор. // Вопросы материаловедения. 2016. № 3. С. 126-137.

19. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Курс М.Г., Бухарев Г.М. Опыт исследований биокоррозии металлов. Практика противокоррозионной защиты. 2016. № 2 (80). С. 36–57.

20. FWHA-RD-01-156, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (2002). NACE Corrosion 2010 Wrap-Up report, 19 p. <http://www.nace.org>. (Дата обращения 05.04.2016).

21. Лаптев А.Б., Навалихин Г.П. Повышение безопасности эксплуатации промысловых нефтепроводов // Нефтепромысловое дело. 2006. № 1. С. 48–52.

22. Ахияров Р.Ж., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б. Проблемы подготовки оборотных и сточных вод предприятий нефтедобычи // Нефтепромысловое дело. 2008. № 9. С. 61–65.

23. Кулезнев В.Н., Ушакова О.Б. Структура и механические свойства полимеров. (Конспект курса лекций. Часть 3). М.: МИТХТ, 2006. С 28-31.

24. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. «Методика проведения и обработки результатов натуральных испытаний неметаллических материалов» // Клеи. Герметики. Технологии, №1, 2007 г.

25. ГОСТ-15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды»

26. ОСТ 1 90368-86 «Самолеты и вертолеты. Выбор материалов и покрытий для противокоррозионной защиты».

27. ГОСТ-26883 «Внешние воздействующие факторы. Термины и определения».

УДК 691:663.63

Строительные материалы на основе отходов производства минеральной ваты с повышенной биологической и климатической стойкостью¹

Ерофеев В.Т.¹, д.т.н.; Родин А.И.¹, к.т.н.; Якунин В.В.¹

yerofeevvt@mail.ru, AL_Rodin@mail.ru, vladisjakunin@yandex.ru

¹*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», Саранск*

Аннотация:

Представлены результаты исследований по получению строительных материалы на основе отходов производства минеральной ваты с повышенной биологической и климатической стойкостью. Разработаны составы портландцементов с использованием в качестве активной минеральной добавки представленных отходов. Получены шлакощелочные вяжущие и композитов на их основе. Разработаны составы асфальтобетонов с использованием в качестве заполнителей представленных отходов. Все разработанные материалы отвечают требованиям действующих нормативных документов, являются водостойкими и грибостойкими, а отдельные составы обладают фунгицидными свойствами.

Ключевые слова:

отходы производства минеральной ваты, композит, биологическая и климатическая стойкость.

¹ Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации МК-6416.2018.3

Введение

Согласно Федеральному закону от 29 декабря 2014 года N458-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (с изменениями на 31 декабря 2017 года) приоритетными направлениями государственной политики в области обращения с отходами являются: максимальное использование исходных сырья и материалов, предотвращение образования отходов и др. На территории Российской Федерации в отвалах и хранилищах накоплено свыше 100 млрд т твердых промышленных отходов. Сконцентрированные в отвалах и свалках отходы являются источниками загрязнения поверхностных и подземных вод, атмосферы, почвы и растений. При этом изымаются из хозяйственного оборота сотни тысяч гектаров земель. Между тем, в техногенных отходах сосредоточено огромное количество различных сырьевых материалов [1–2]. Одним из видов твердых промышленных отходов являются отходы производства минеральной ваты, которые составляют от 15 до 30% от массы готовой продукции. По данным статистики таких отходов в России скопилось уже около 5–6 млн м³. Традиционно, работы по утилизации отходов минераловатного производства ведутся по двум направлениям: возврат в производство минеральной ваты в качестве дополнительного источника сырья и получение новых строительных материалов [3–7]. Количество отхода задействованного по обоим направлениям остается незначительным и не снимает проблемы утилизации. В то же время, состав и свойства данного вида отхода делает возможным использовать его в качестве активной минеральной добавки при производстве портландцемента, в качестве заполнителя в асфальтобетоне, при получении щелочного вяжущего и композиционных материалов на его основе и многих других видов строительных материалов [1, 3–6, 8].

Является известным, что во время эксплуатации в зданиях и сооружениях с агрессивными биологическими средами природного и техногенного происхождения у строительных материалов и конструкций снижаются прочностные и другие свойства. Биологическое сопротивление

усиливается при повышенной влажности, циклически действующих температур и других факторов окружающей среды. Ежегодный экономический ущерб от биоповреждений в мире достигает десятков миллиардов долларов. Ухудшается внешний вид зданий и экологическая ситуация в них, а также расширяется перечень заболеваний людей, вызванных микроскопическими организмами. Проблема повышения долговечности строительных конструкций и улучшение экологической обстановки в зданиях и сооружениях разрешается посредством использования биоцидных материалов [9–17]. Следовательно, разработка строительных материалов на основе отходов производства минеральной ваты с повышенной биологической и климатической стойкостью, является актуальным направлением исследований в современном строительном материаловедении.

Материалы и методы исследования

При проведении исследования использовались следующие материалы:

Портландцементный клинкер (ПАО «Мордовцемент»), химического состава: CaO – 65,21%, SiO₂ – 21,650 %, Al₂O₃ – 5,54%, Fe₂O₃ – 3,88%, SO₃ – 0,24%, MgO – 1,28%, K₂O – 1,08%, Na₂O – 0,396 %, TiO₂ – 0,234, P₂O₅ – 0,227%, SrO – 0,129%, MnO – 0,046%, ZnO – 0,027%, Cr₂O₃ – 0,011% и минералогического состава: 3CaO·SiO₂ – 60,3%, 2CaO·SiO₂-β 17,8%, 3CaO·Al₂O₃ – 4,5%, 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ – 15,8%, Ca(OH)₂ – 0,6%, CaCO₃ – 0,7%, MgO – 0,3%.

Отхода производства минеральной ваты (ООО «Комбинат теплоизоляционных изделий» г. Саранск), химического состава: CaO – 29,62-29,93%, SiO₂ – 43,81-43,88%, Al₂O₃ – 9,13-9,21%, Fe₂O₃ – 3,73-3,94%, SO₃ – 0,23-0,24%, MgO – 8,33-8,43%, K₂O – 0,71-0,72%, Na₂O – 1,33-1,37%, TiO₂ – 0,46-0,47%, P₂O₅ – 0,03-0,04%, SrO – 0,07 %, MnO – 0,16%, ZnO – 0,002%, Cr₂O₃ – 0,01%, ППП – 1,8% и минералогического состава: β-SiO₂ – 5,0%, Ca₂Al₂SiO₇ – 1,2%, Ca₂MgSi₂O₇ – 23,8%, Аморфная фаза – 70,0% (для

отходов фракции больше 0,63 мм) и β -SiO₂ – 5,6%, Ca₂Al₂SiO₇ – 3,4%, Ca₂MgSi₂O₇ – 1,0%, Аморфная фаза – 90,0% (для отходов фракции меньше 0,63 мм). Зерновой состав отходов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика зернового состава отходов минераловатного производства
ООО «Комбинат теплоизоляционных изделий» (г. Саранск)

Остатки на ситах, %	Размеры отверстий, мм								Прошло сквозь сито 0,16 мм
	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Частные	2,0	5,7	8,9	9,1	5,4	10,6	19,8	27,0	11,3
Полные	2,0	7,7	16,6	25,7	31,1	41,7	61,5	88,5	100,0

Натр едкий технический (NaOH), отвечающий требованиям ГОСТ Р 55064-2012.

Битум нефтяной дорожный марки БНД 60/90, отвечающий требованиям ГОСТ 22245-90.

Битумная адгезионная присадка БП «Адгезол №6», соответствующая ТУ 0257-003-99907291-2010.

Гранитный щебень производства БЩЗ филиал ООО «Дорисс-Урал» (фракция – 5–20, марка щебня по дробимости М1200, истинная плотность – 2 790 кг/м³).

Кварцевый песок Енгальчевского месторождения. Истинная и насыпная плотности песка равны 2 630 кг/м³ и 1 253 кг/м³ соответственно. Модуль крупности $M_k = 1,26$. Зерновой состав кварцевого песка приведен в таблице 2.

Характеристика зернового состава кварцевого песка и минерального порошка

Остатки на ситах, %	Размеры отверстий, мм						Поддон
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	
Кварцевый песок							
Частные	0	0	1,1	15,3	60,6	13,0	10,0
Полные	0	0	1,1	16,4	77,0	90,0	100,0
Минеральный порошок МП-1							
Частные	0	0	0,3	2,5	6,2	23,3	67,7
Полные	0	0	0,3	2,8	9,0	32,3	100,0

Минеральный порошок МП-1 неактивированный производства ООО «Иссинский КСМ», отвечающий требованиям ГОСТ Р 52129-2003. Зерновой состав минерального порошка приведен в таблице 2.

Модифицированный цемент получали смешиванием портландцемента с размолотыми до удельной поверхности 290–300 м²/кг отходами производства минеральной ваты.

В работе исследовались основные технологические свойства цементных композиций: нормальная плотность, сроки схватывания, равномерность изменения объема, в соответствии с ГОСТ 310.3-76, и водоотделение по ГОСТ 310.6-85. Прочностные характеристики цементного камня, модифицированного отходами производства минеральной ваты, полученного из теста нормальной плотности, и твердевшего в нормально-влажностных условиях определялись на образцах с размерами 2×2×2 см. За окончательный результат принималось среднеарифметическое значение не менее 10 образцов. Биологическая стойкость полученных композитов определялась в соответствии с ГОСТ 9.049-91.

Способ изготовления шлакощелочного вяжущего и композитов на его основе с использованием отходов производства минеральной ваты заключался в следующем. В работающий смеситель постепенно загружали отходы, предварительно размолотые до удельной поверхностью от 250 до

500 м²/кг и щелочной компонент. Перемешивали 5–7 минут. Из полученной смеси формовали изделия и подвергали их пропариванию (ТВО) при температуре 90°C по режиму 3:8:2.

В работе исследованы прочностные характеристики в соответствии с ГОСТ 310.4-81, водостойкость по изменению прочности композитов после выдерживания в воде и биостойкость по ГОСТ 9.049-91.

Асфальтобетоны с применением отходов производства минеральной ваты изготавливали в соответствии с ГОСТ 9128-2013. Исследование физико-механических свойств полученных асфальтобетонов проводилось по ГОСТ 12801-98. Изучение видового состава микроорганизмов, заселяющихся на поверхности разработанных асфальтобетонов проводилось после 1 года экспонирования образцов в условиях переменной влажности морского побережья (г. Геленджик) на открытой площадке у моря и под навесом.

Экспериментальная часть

В результате проведенных исследований технологических свойств цементных композиций, модифицированных отходами производства минеральной ваты установлено, что с увеличением в цементе количественного содержания данных отходов нормальная плотность цементного теста уменьшается прямопропорционально с 28,5% (без добавки) до 25% (с 40% содержанием добавки от массы цемента). Все говорит о положительном влиянии отходов производства минеральной ваты на нормальную плотность цементного теста. Содержание отходов в портландцементе в количестве от 5% до 40% от его массы практически не сказывается на сроки схватывания цементного теста нормальной плотности и его равномерность изменения объема. Установлено влияние содержания отходов производства минеральной ваты на водоотделение цемента. При увеличении содержания в портландцементе отходов, водоотделение увеличивается прямопропорционально с 2,3% (без добавки) до 10,8% (с

40% содержанием добавки от массы цемента). Все составы отвечают требованиям действующих нормативных документов (водоотделение не превысило 25%), что также говорит о пригодности использования отходов производства минеральной ваты в качестве добавок для цемента.

На рис. 1 представлена зависимость изменения прочности при сжатии цементного камня от количественного содержания в нем отходов производства минеральной ваты.

Прочность цементного камня, содержащего в составе отход в количестве 5–10% от массы цемента, увеличивается к 28 суткам твердения на 5–7% по сравнению с контрольным составом. С увеличением количества отхода в цементе до 40% происходит незначительное снижение прочности при сжатии. Однако это не соизмеримо с экономической выгодой вследствие уменьшения количества цемента в составе. Например, прочность цементного камня, содержащего 40% отхода от массы вяжущего, уменьшается всего на 12%, что делает возможным получение класса цемента по прочности равного классу рядового цемента, но при этом заменить 40% клинкера дешевым сырьем.

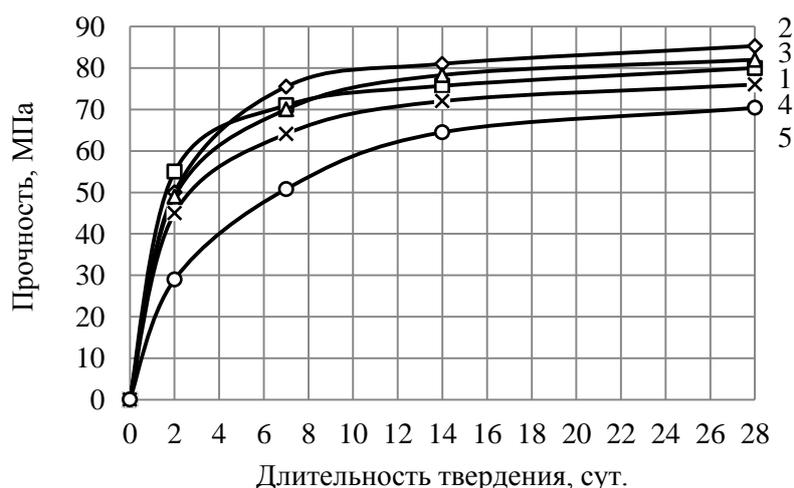


Рис. 1 – Кинетика набора прочности при сжатии цементов, модифицированных отходами производства минеральной ваты в процентах от массы цемента:
1 – 0 %, 2 – 5 %; 3 – 10 %, 4 – 20 %, 5 – 40 %

В результате проведенных исследований биологической стойкости цементного камня установлено, что при содержании в их составе до 40% отходов минераловатного производства материал обладает грибостойкими свойствами.

В результате проведенных исследований физико-механических свойств шлакощелочных вяжущих с применением отходов производства минеральной ваты и композитов на их основе установлено, что наиболее эффективно процесс структурообразования в рассматриваемой системе протекает при соотношении NaOH/отход равном 2/100–3/100. Средняя плотность композитов на основе разработанных вяжущих с увеличением количественного содержания в составе NaOH от 1% до 12% (от массы отхода) уменьшается прямопропорционально с 2 130 кг/м³ до 2 030 кг/м³.

Как известно, одним из значительных факторов, влияющих на активность вяжущего является его тонкость помола. Установлено, что водопотребность разработанных вяжущих (2 % NaOH от массы отходов) с увеличением тонкости помола с 250 м²/кг до 400 м²/кг увеличивается прямопропорционально с 24% до 26,5%. При дальнейшем увеличении тонкости помола с 400 м²/г до 500 м²/кг водопотребность увеличивается незначительно с 26,5% до 27,5%. Оптимальная дисперсность вяжущего на основе отходов производства минеральной ваты составляет 400–450 м²/кг. Предел прочности при сжатии в данном случае достигает 62–68 МПа, а при изгибе не менее 13,5 МПа.

В настоящее время большое внимание уделяется повышению долговечности строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатирующийся в условиях воздействия агрессивных сред. Как уже было отмечен выше, в последнее время проблема биокоррозии строительных материалов, изделий и конструкций стала особенно актуальной. В связи с чем нами были проведены исследования по изучению влияния состава шлакощелочного вяжущего на обрастаемость и

установлению видового состава микроорганизмов на образцах композитов. Установлено, что шлакощелочные композиты, изготовленные на основе отходов производства минеральной ваты и щелочного раствора, содержащих от 1,6% до 7,9% NaOH являются грибостойкими, а на образцах композитов после месяца испытаний в стандартной среде мицелиальных грибов выделен доминирующий вид микромицетов рода *Penicillium* (*Penicillium cyclosporum*), а при содержании 9,5% NaOH приобретают фунгицидные свойства.

Как уже было отмечено выше микроскопические организмы более интенсивно развиваются при повышенной влажности и оптимальных температурных условиях. Следовательно, кроме биологической коррозии строительные материалы могут разрушаться и вследствие действия воды. В результате проведенных исследований водостойкости разработанных шлакощелочных композитов установлено, что композиты на основе вяжущего из отходов производства минеральной ваты обладают повышенной водостойкостью. После экспонирования образцов в водной среде в течение 100 суток их прочность при сжатии увеличилась на 25% при соотношении NaOH/отход равном 2/100, на 35% при соотношении 3/100, и на 15% уменьшилась при соотношении NaOH/отход равном 1/100. Однако, для всех испытанных составов наблюдается тенденция к увеличению прочности при сжатии, что говорит об ускорении процессов гидратации данных композитов в воде.

Представленные ниже результаты исследований посвящены изучению физико-механических свойств асфальтобетонов, модифицированных отходами производства минеральной ваты, а также изучению видового состава микроорганизмов, заселяющихся на их поверхности при выдерживании в условиях переменной влажности морского побережья (г. Геленджик).

Составы испытанных в работе асфальтобетонных смесей, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Составы асфальтобетонных смесей

№ п/п	Наименование материалов	Составы, % (битум сверх 100%)								
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
1	Щебень фр. 5-20 мм	38	35	32	34	34	34	34	34	35
2	Отходы ООО «КТИ»	38	47	56	46	46	46	46	46	47
3	Песок природный	21	15	9	15	14	13	13	15	15
4	Минеральный порошок	3	3	3	5	6	7	7	5	3
5	Битум БНД 60/90 (Рязань) + "Амдор 9" - 0,5 %	5,0	6,0	7,0	6,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0

Все испытанные составы отвечают нормативным требованиям ГОСТ 9128-2013 по зерновому составу.

В результате проведенных нами исследований физико-механических свойств асфальтобетонных смесей, модифицированных отходами производства минеральной ваты, установлено, что увеличение количественного содержания отходов в составе асфальтобетонной смеси (количество минпорошка постоянное и равно 3%) приводит к увеличению количественного содержания битума с 5 % при минимальном количестве отходов до 7 % при максимально возможном количестве (зерновой состав отвечает нормативным требованиям). Также необходимо отметить увеличение плотности составов с 2 250 до 2 330 кг/м³, уменьшение пористости минерального остова с 20,9% до 19,8%, остаточной пористости с 10,2% до 4,6%, водонасыщения с 9,45% до 2,7%. Прочностные характеристики, а также коэффициент водостойкости при содержании отходов от 38 до 56% от общего количества минеральной части смеси в пределах нормативно допустимых значений. Необходимо отметить, что

только при содержании 7% битума водонасыщение образцов в рамках нормативно допустимых значений.

В результате проведенной оптимизации составов асфальтобетонов с применением отходов по показателю водонасыщения. Как известно, водонасыщение можно понизить большим количественным содержанием минерального порошка в бетоне. Так, при увеличении минерального порошка в асфальтобетоне с 3 до 7% при содержании битума равном 6% водонасыщение уменьшается незначительно. Следовательно, вводить дополнительно минеральный порошок в состав асфальтобетона нецелесообразно, так как данный компонент достаточно дорогой.

После 1 года испытания модифицированных отходами асфальтобетонов в условиях переменной влажности морского побережья (г. Геленджик) на их поверхности выделено: на открытой площадке – 8 родов микромицетов: 3 вида рода *Aspergillus* (*Aspergillus terreus*, *Aspergillus ustus*, *Aspergillus clavatus*), по 2 вида родов *Chaetomium* (*Chaetomium dolichotrichum*, *Chaetomium bostrychodes*), *Penicillium* (*Penicillium nigricans*, *Penicillium urticae*), и *Alternaria* (*Alternaria brassicae*, *Alternaria pluriseptata*), по 1 виду родов *Rhizopus* (*Rhizopus cohnii*), *Cladosporium* (*Cladosporium elatum*), *Gliocladium* (*Gliocladium catenulatum*), *Trichoderma* (*Trichoderma viride*); под навесом – 6 видов рода *Penicillium* (*Penicillium nigricans*, *Penicillium lanosum*, *Penicillium nigricans*, *Penicillium tardum*, *Penicillium oxalicum*, *Penicillium variabile*), 4 вида рода *Aspergillus* (*Aspergillus ustus*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus clavatus*), 3 вида рода *Alternaria* (*Alternaria brassicae*, *Alternaria alternate*, *Alternaria pluriseptata*), 2 вида рода *Cladosporium* (*Cladosporium elatum*, *Cladosporium macrocarpum*), по 1 виду родов *Chaetomium* (*Chaetomium dolichotrichum*), *Paecilomyces* (*Paecilomyces variotii*), *Mucor* (*Mucor corticola*). Физико-механические свойства асфальтобетонных образцов после 1 года

испытания на открытой площадке у моря и под навесом практически не изменились.

Выводы и рекомендации

1. Получены новые строительные материалы на основе отходов производства минеральной ваты, обладающие улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, а также повышенной биологической и климатической стойкостью.

2. С позиции обеспечения получения материалов с нормативными и улучшенными свойствами в результате проведенных исследований подтверждена возможность использования отходов производства минеральной ваты в качестве активной минеральной добавки для портландцемента, а также установлено рациональное содержание составляющих компонентов в цементе.

3. Композиты на основе шлакощелочных вяжущих с применением отходов производства минеральной ваты обладают прочностью при сжатии равной 68 МПа, а при изгибе – 13,5 МПа. Композиты отличаются повышенной водостойкостью и грибостойкостью, что дает возможность рекомендовать использовать их в зданиях и сооружениях с агрессивными биологическими средами.

4. Разработаны составы асфальтобетонов с применением отходов производства минеральной ваты, отвечающие всем требованиям нормативно-технической документации, а также установлен видовой состав микроорганизмов, заселяющихся на их поверхности после 1 года экспонирования в условиях переменной влажности морского побережья (г. Геленджик) на открытой площадке у моря и под навесом.

Литература

1. Mehta A., Siddique R. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 183–198.

2. Piatak N.M., Parsons M.B., Seal R.R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 57. Pp. 236–266.

3. Вдовина Е. В. Получение керамического кирпича на основе бейделлитовой глины и отходов минеральной ваты : дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2011. – 166 с.

4. Нефедова И. Н. Отходы производства минеральной ваты как техногенное сырье / И. Н. Нефедова, Н. С. Крашенинникова, Е. Г. Гарбер // *Химия и химическая технология неорганических веществ и материалов : материалы Третьей науч. Конф.* – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2011.– С. 33–34.

5. Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Ilikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017. Vol. 19. № 3. Pp. 1220–1227.

6. Kubiliute R., Kaminskas R., Kazlauskaite A. Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 88. Pp. 130–138.

7. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Ilikainen M. Utilization of mineral wools as alkali-activated material precursor. *Materials*. 2016. Vol. 9, № 5. Article number 312.

8. Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. *Alkali-Activated Cements and Concrete*. Taylor & Francis. London and New York, 2006. 388 p.

9. Антонов В.Б., Беляков Н.А., Васильева Н.В., Елинов Н.П., Старцев С.А., Хурцилава О.Г., Щербо А.П. Биоповреждения больничных зданий и их влияние на здоровье человека. СПб.: МАПО, 2008. 232 с.

10. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М., Челмакин А.Ю. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной среды бактерий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 1. С. 11–17.

11. Ерофеев В.Т., Комохов П.Г., Смирнов В.Ф., Светлов Д.А., Казначеев С.В., Богатов А.Д., Морозов Е.А., Васильев О.Д., Макаревич Ю.М., Спиринов В.А., Пацюк Н.А. Защита зданий и сооружений от биоповреждений биоцидными препаратами на основе гуанидина. СПб: Наука, 2010. 192 с.

12. Ерофеев В.Т., Родин А.И. Биостойкость декоративных цементных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 32–38.

13. Родин А.И., Ерофеев В.Т., Пустовгар А.П., Еремин А.В., Пашкевич С.А., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Адамцевич А.О. Кинетика набора прочности биоцидных цементов // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 88–97.

14. Родин А.И., Карпушин С.Н., Боциев Б.В., Балатханова Э.М., Смирнов В.Ф., Ерофеев В.Т. Повышение биостойкости цементных композитов с помощью препарата «Ультрадез-Био» // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-9. С. 1946–1950.

15. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2001. 196 с.

16. Erofeev V., Rodin A., Rodina N., Kalashnikov V., Irina, E. Biocidal Binders for the Concretes of Unerground Constructions. Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1448–1454.

17. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G. Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51. № 4. Pp. 377–384.

УДК 53.093:67.017

Методические особенности измерений механических показателей полимерных композиционных материалов при их старении

Старцев О.В.¹, д.т.н.; Славин А.В.¹, д.т.н.

startsevov@gmail.com

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва*

Аннотация:

Обсуждаются методические требования определения механических свойств ПКМ при климатическом старении.

Ключевые слова:

ПКМ, старение, свойства.

Стекло,- угле-, органопластики и другие полимерные композиционные материалы (ПКМ) авиационного назначения обладают хорошими механическими показателями после изготовления, но из-за старения в натуральных климатических условиях ухудшают свои свойства [1–4]. В «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных во ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, особую актуальность имеет направление 18.2 «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» [5]. В связи с этим в докладе обсуждаются методические особенности измерений механических показателей при климатических испытаниях

ПКМ. Целью работы является обзор методических работ, рассматривающих повышение достоверности измерений обобщенного показателя — относительного коэффициента сохраняемости $k_R=R_t/R_0$, где R_t — пределы прочности и модули упругости при растяжении (σ_b, E_t), сжатии (σ_c, E_c), изгибе (σ_b, E_b), межслойном сдвиге (τ, G), измеренные после различных сроков экспонирования; R_0 — исходные значения соответствующих показателей.

По результатам исследований многих авторов [1,2] механические показатели ПКМ при экспонировании в натуральных климатических условиях изменяются из-за протекания следующих физических и химических превращений: пластификации полимерных матриц атмосферной влагой, набухания (увеличения толщины) образцов при сорбции влаги, деструкции полимерных матриц под действием солнечной УФ-радиации и кислорода воздуха, гидролиза полимерных матриц под действием влаги, доотверждения полимерных матриц, активируемого температурой и пластифицирующим воздействием влаги, разориентации органических волокон под действием УФ-радиации Солнца, термовлажностного циклирования и механических нагрузок, структурной релаксации и усадки волокон, образующих каркас из армирующего наполнителя, структурной релаксации полимерных матриц, образования пор, микротрещин и других микродефектов в объеме полимерных матриц и на границе полимер-наполнитель, образования поверхностных трещин, расслоений и других дефектов. Общей задачей климатических испытаний является установление соответствия между действием доминирующих факторов старения и изменением показателей k_R для прогнозирования механических свойств ПКМ на заданное время эксплуатации.

На рис. 1 представлена схема климатических испытаний ПКМ, рекомендованная для прогнозирования механических свойств материалов авиационного назначения [6].



Рис. 1 – Схема климатических испытаний ПКМ

По данным [7] ПКМ авиационного назначения после экспонирования в открытых климатических условиях в течение 1–3 в большинстве случаев изменяют значения показателей k_R в пределах $\pm 10\%$. Это подтверждается анализом гистограмм распределения относительного коэффициента сохраняемости механических показателей k_R на рис. 2.

Если после 1–3 лет экспозиции механический показатель ПКМ изменился более, чем на 10–20%, то вероятной причиной может оказаться не старение ПКМ [1–4], а методический недостаток при выполнении измерений [7].

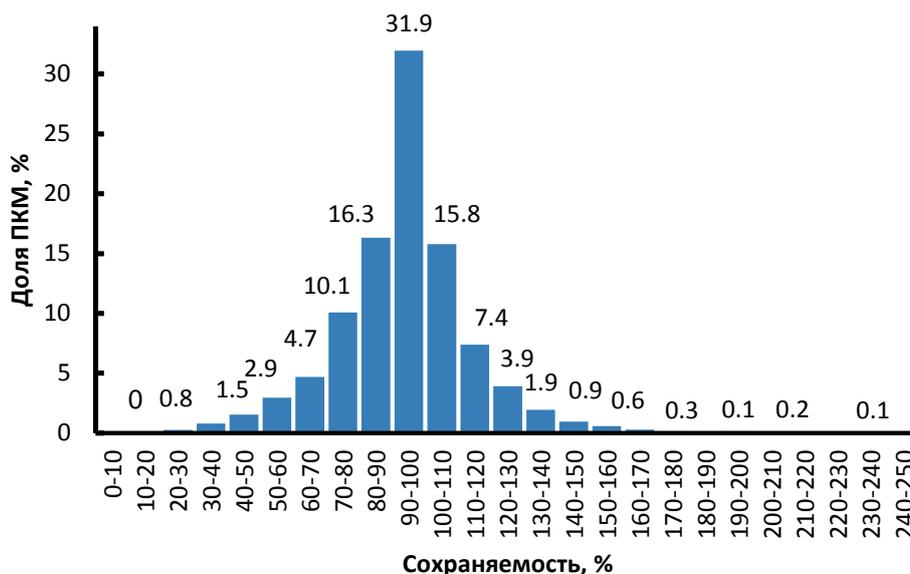


Рис. 2 – Гистограмма распределения сохраняемости механических показателей 3300 наборов ПКМ после 1-23 лет климатического старения [7]

Практика показывает (рис. 3), что при корректных механических измерениях по мере увеличения продолжительности экспонирования показатель R изменяется монотонно в соответствии с уравнением

$$R = R_1 e^{-at} - R_2 e^{-bt} + R_\infty, \quad (1)$$

в котором a, b — константы скорости деструкции и структурирования эпоксидных матриц; R_1, R_2 — предэкспоненциальные множители; R_∞ — предельное значение показателя R при продолжительности экспонирования $t \rightarrow \infty$.

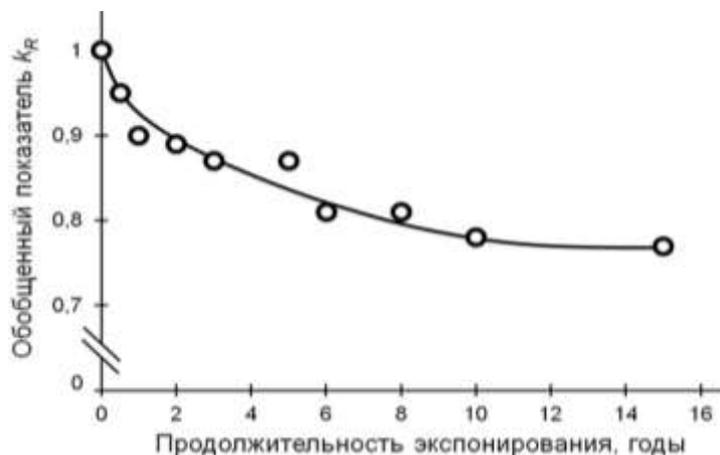


Рис. 3 – Пример монотонного уменьшения механического показателя из-за деструкции полимерной матрицы

Если показатель изменяется немонотонно (рис. 4) [8], то скачки показателя с большой степенью вероятности являются следствием методических ошибок.

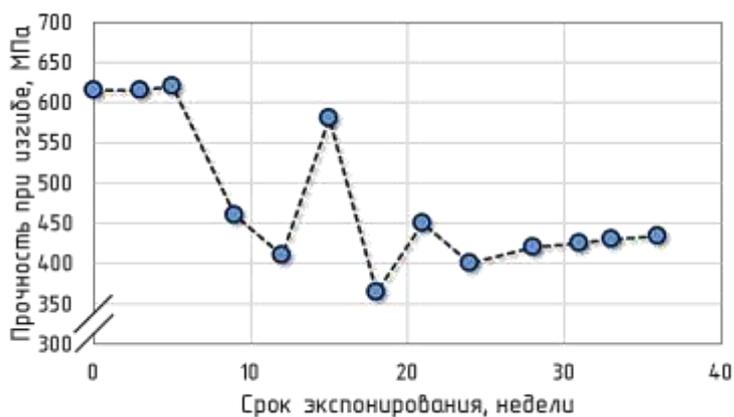


Рис. 4 – Изменение прочности при изгибе стеклопластика СТ-69Н-15П при экспонировании в умеренно холодном климате по данным [8]

Анализ показывает, что наиболее распространенными причинами методических ошибок являются:

1. Нарушения требований стандартов механических измерений.
2. Ошибки при приготовлении образцов.
3. Не контролируемый обратимый эффект пластифицирующего действия влаги.
4. Температурные эффекты обобщенного показателя климатического старения.
5. Различия показателей механических свойств ПКМ в серии отпрессованных плит.
6. Масштабный фактор (толщина пластин и неоднородность старения по толщине).

Распространенным примером нарушения требований стандартов механических измерений является разрушение образцов в зажимах или

вблизи зажимов, а не в рабочей зоне образца. Рекомендации по устранению этого недостатка подробно рассмотрены в [9].

Рис. 5 иллюстрирует источник ошибок при приготовлении образцов [7]. Для подтверждения значимости этой ошибки выполнены измерения Однонаправленный углепластик КМКУ-3.150.Э0,1.45 на основе углеродной ленты Элур-П и эпоксидного связующего ВСК-14-3 характеризуется существенной анизотропией. Его предел прочности при изгибе σ_b для образцов в направлении армирования составляет 1100 МПа, но уменьшается до 55 МПа для образцов вырезанных под углом 90° .

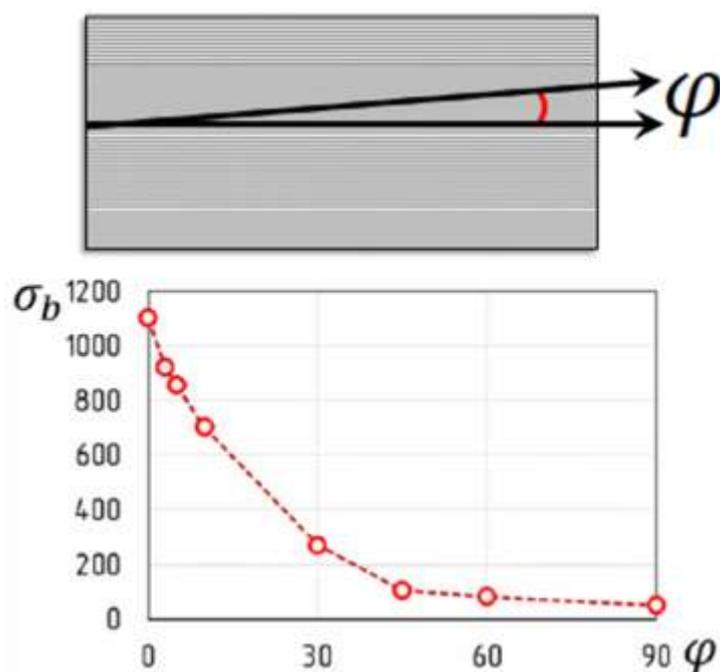


Рис. 5 – Зависимость предела прочности при изгибе однонаправленного углепластика КМКУ-3.150.Э0,1.45 от угла между продольной осью образца и направлением армирования [7]

Если при вырезке образцов вдоль направления армирования будет допущена ошибка ± 3 град между продольной осью образца и направлением армирования, то показатель σ_b будет определен с ошибкой 16%. Поэтому при оценке климатического воздействия необходимо обеспечивать точное соответствие оси образца с направлением

армирования композита или использовать образцы, вырезанные под углами, близкими к 90 град, при которых подобные отклонения влияют на величину измеряемого показателя незначительно.

Табл. 1 показывает пример влияния сушки и увлажнения при 60°C образцов стеклопластика на основе ткани TP-0,56, и связующего ЭСФ-2ТА после 3 лет экспонирования в ГЦКИ в ангаре и под навесом [10].

Таблица 1

Механические характеристики стеклопластика на основе ткани TP-0,56 и связующего ЭСФ-2ТА после 3 лет экспонирования в условиях ГЦКИ [10]

Состояние	Условия кондиционирования	Изменение массы образцов, %	Предел прочности при изгибе σ_B , МПа	Модуль упругости при изгибе E , ГПа
Исходное состояние	Без сушки	0	445	21,6
	Сушка	-0,24	457 (+3%)	22,8 (+6%)
	Увлажнение	+0,42	290 (-35%)	18,8 (-13%)
После 3 лет старения под навесом ГЦКИ	Без сушки	0	246 (-45%)	16,5 (-24%)
	Сушка	-0,29	391 (-12%)	20,0 (-7%)
	Увлажнение	+0,97	231 (-48%)	16,5 (-24%)

Видно, что из-за старения стеклопластика под навесом его прочность при изгибе уменьшается на 45%, модуль упругости при изгибе на 24%. Снижение механических показателей обусловлено необратимыми изменениями (деструкцией связующего в поверхностном слое) и обратимыми изменениями (пластификацией влагой, сорбированной при экспонировании). После высушивания и исключения пластифицирующего воздействия из-за необратимых изменений прочность стеклопластика при изгибе уменьшается всего лишь на 12%, а модуль упругости при изгибе только на 7%. В результате климатического старения под навесом в течение 3 лет снижение механических показателей при предельном влагонасыщении составляет 48% для предела прочности при изгибе и 24% для модуля упругости. Эти значения определяют максимальный уровень

изменения механических показателей стеклопластика в процессе экспонирования за указанный период.

Если под действием климатических факторов изменяются температуры начала T_1 и окончания T_2 перехода полимерной матрицы из стеклообразного в высокоэластическое состояние, то температурная зависимость показателя k_R может приобретать экстремальный характер [11]. Рис. 6а иллюстрирует случай уменьшения механического показателя R из-за деструкции полимерной матрицы или ее пластификации влагой. Обычно при этом область стеклования смещается к низким температурам, что вызывает значительное снижение k_R в интервале от T_1 до T_2 . В случаях доминирования структурной релаксации или доотверждения связующего (рис. 6б) механические показатели R и температура стеклования полимерной матрицы возрастают. Если в экспонированном материале смещение T_1 достаточно велико, то это заметно увеличивает показатель k_R внутри интервала стеклования.

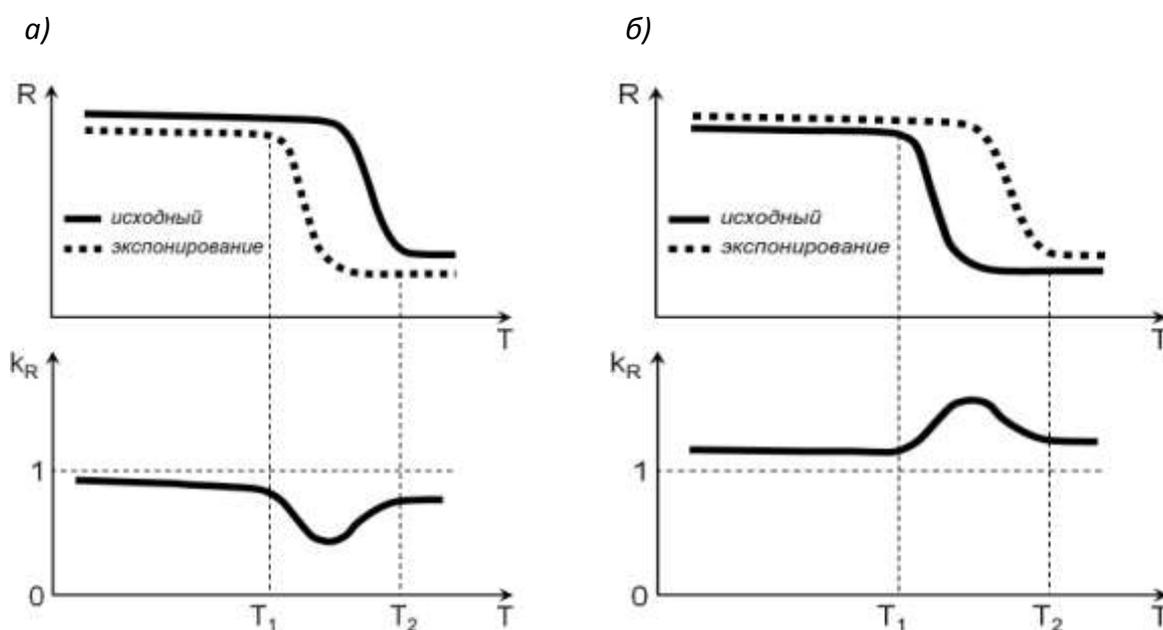


Рис. 6 – Температурные зависимости показателей R (вверху) и k_R (внизу) ПКМ в исходном состоянии и после экспонирования в климатических условиях при доминировании процессов деструкции или пластификации полимерной матрицы (а); при доминировании доотверждения и структурной релаксации полимерной матрицы (б). T_1 и T_2 — нижняя и верхняя границы интервала стеклования полимерной матрицы

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы.

Для повышения достоверности определения механических свойств ПКМ при климатическом старении в исходном состоянии и после завершения очередных этапов экспонирования необходимо обеспечить следующие методические требования:

1. В соответствии со стандартами (ГОСТ, ASTM) подготовить образцы для измерений и выполнить предварительные оценки (влияние формы и размеров образцов, способов закрепления образцов в зажимах, угла вырезки образцов к основному направлению армирования).

2. Проверить разброс показателей для образцов, вырезанных из разных плит. Вычислить коэффициенты вариации, по которым определить количество образцов для обеспечения требуемой точности.

3. Измерить контролируемый показатель для нескольких температур, в том числе, ниже и выше температуры стеклования полимерной матрицы.

4. Выполнить измерения для образцов в состоянии поставки или момент съема, после полного высушивания и увлажнения при 60°C.

Без строгого выполнения указанных методических требований не будет достигнута высокая достоверность измерений механических показателей и не оправдаются расходы на проведение длительных дорогостоящих климатических испытаний ПКМ.

Литература

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. 1. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 11. С. 19–27.

2. 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.

3. Старцева Л.Т., Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диффузия влаги в стеклопластики после их климатического старения. // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 3. С. 305–309.

4. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги. // Труды ВИАМ. 2014. № 7. С. 9.

5. 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. С. 3–33.

6. Старцев О.В., Кириллов В.Н., Рудольф А.Я. Новые возможности в исследованиях климатического старения полимерных композиционных материалов. // В сборнике: Гидроавиасалон-2010 8 научная конференция по гидроавиации. . 2010. М. Часть 2. С. 97–101.

7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников. // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2. С. 47–58.

8. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Деев И.С. К вопросу о методике проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Сб. докл. 8 науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010». М., 2010. Ч. 2. С. 102–106.

9. Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П., Рудольф А.Я., Старцев О.В., Тихонов В.Б. Методы механических испытаний композиционных стержней монография / Министерство образования и науки РФ, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального

образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". Бийск, 2011.

10. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В. Обратимые эффекты влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях. // Труды ВИАМ. 2018. №5. С. 110-118.

11. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате. / Диссертация в форме научного доклада. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Москва, 1990.

УДК 620.169.2, 620.169.1

Работоспособность эластомерных клеевых соединений конструкций летательных аппаратов в условиях ускоренного климатического старения

Терехин А.В.¹, к.т.н.; Русин М.Ю.¹, д.т.н.;

Антонов В.В.¹; Рауткин А.С.¹

aterehin@list.ru, info@technologiya.ru

¹Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина», Государственный научный центр Российской Федерации (АО «ОИПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»)

Аннотация:

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния ускоренного климатического старения на работоспособность клеевых соединений системы «металл-керамика», применяемых в конструкциях высокоскоростных летательных аппаратов и выполненных на основе эластомерного клея-герметика Виксинт У-2-28НТ. Исследуется работоспособность клеевых соединений в условиях повышенных температур эксплуатации в диапазоне от 220 до 340°С.

Ключевые слова:

Клеевые соединения, прочность, долговечность, ускоренное старение, Виксинт.

Клеевые соединения на основе высокоэластичных эластомерных герметиков типа ВИКСИНТ в настоящее время широко используются во

многих отраслях промышленности благодаря ряду преимуществ по отношению к другим способами соединения. В частности, в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) авиационной и ракетно-космической техники эластомерные клеевые соединения (КС) зачастую являются единственно возможным способом обеспечения надежного и герметичного соединения хрупких неметаллических элементов конструкции (керамических или полимерно-композиционных) с металлическим корпусом ЛА [1, 2].

Использование герметиков типа ВИКСИНТ в конструкциях современных высокоскоростных ЛА, назначенный срок службы которых достигает 18 лет и более, приводит к необходимости оценки сохраняемости наиболее ответственных эксплуатационных свойств КС на основе данных герметиков в процессе и после многолетнего климатического старения.

Методика исследований.

Для оценки сохраняемости свойств КС системы «металл-стеклокерамика» на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28НТ использовался метод ускоренных испытаний [3], при этом в качестве характерных показателей старения определены следующие эксплуатационные свойства КС:

- прочность КС при сдвиге [$\tau_{сд}$];
- долговечность (время до разрушения) при квазистатическом теплосиловом нагружении [t^*].

Исследования указанных показателей старения проводились в температурном диапазоне от 220°C до 340°C, что обусловлено режимами эксплуатации узлов конструкций ЛА, в которых используется исследуемый герметик.

Расчет длительности ускоренного режима климатического тепловлажностного старения проводился согласно следующему соотношению:

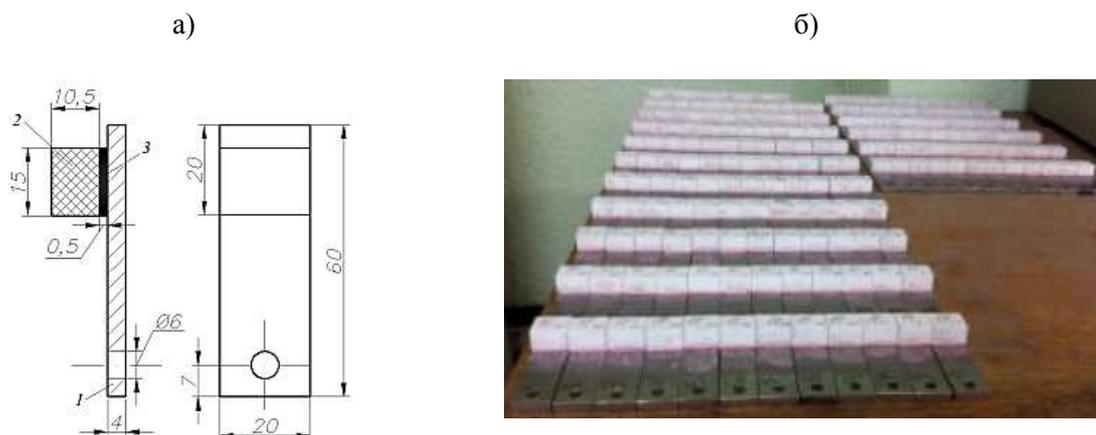
$$\tau_y = H \cdot \prod_{i=1}^l \prod_{j=1}^k \frac{\varphi_{эj}}{\varphi_y} \tau_{эij} \exp \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_{эi}} \right), \quad (1)$$

где T , φ , τ – температура [К], относительная влажность и длительность хранения (с индексом «э»), ускоренного старения (индекс «у»); E – энергия активации [кал/моль]; R – универсальная газовая постоянная; i , l – число градаций температуры в заданных климатических условиях; n – порядок реакции (принят равным 1); H – длительность хранения (годы).

Для расчета использовалось значение энергии активации E герметика ВИКСИНТ У-2-28НТ равное $E = 9$ ккал/моль и определенное изотермическим методом в соответствии с [4].

Исходя из соотношения (1) с учетом средней продолжительности существования температурно-влажностных комплексов в отапливаемом железобетонном хранилище длительность одного ускоренного годового цикла при температуре $T_y=85$ °С и относительной влажности воздуха $\varphi_y=75$ % составляет $\tau_y=312$ часов (13 суток).

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены образцы КС, представляющих собой соединение металлической пластины из сплава 32НКД (инвар) и беспористой ($\Pi < 1,0\%$) стеклокерамики литийалюмосиликатного состава, склеенных между собой с помощью герметика ВИКСИНТ У-2-28НТ. Схема образца приведена на рисунке 1.



а) схема образца (1 – металлическая пластина, 2 – керамическая призма; 3 – клей-герметик); б) внешний вид образцов (исходное состояние)

Рис. 1 – Образцы для испытаний на ускоренное старение

Изготовленные образцы подвергались ускоренному тепловлажностному старению в климатической камере типа ТСС 7200 в течении 390 суток (при $T_y=85^{\circ}\text{C}$ и $\varphi_y=75\%$), соответствующему 30-ти годам хранения в условиях отапливаемого железобетонного хранилища. При этом каждые 5 лет проводился съем партии образцов для контроля деградации показателей старения.

Испытания образцов на прочность при сдвиге и долговечность при квазистатическом теплосиловом воздействии проводились на разрывной испытательной машине Instron.

Результаты испытаний

На рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости прочности при сдвиге КС на основе герметика Висксинт У-2-28НТ при температурах испытаний $T_{и}$ равных 220°C , 260°C , 300°C и 340°C от длительности ускоренного тепловлажностного старения соответствующей указанной на графиках длительности хранения. Построение каждой точки на графиках осуществлялось путем осреднения результатов прочности КС, полученных при испытаниях четырех образцов, при этом в расчете учитывались только образцы КС, имеющие когезионный характер разрушения при испытаниях.

В качестве примера на рис. 3 приведен внешний вид образцов после разрушения при температуре испытаний 220°C. Внешний вид поверхности разрушения свидетельствует о когезионном характере разрушения КС, что говорит о соблюдении требований к качеству подготовки поверхностей субстратов.

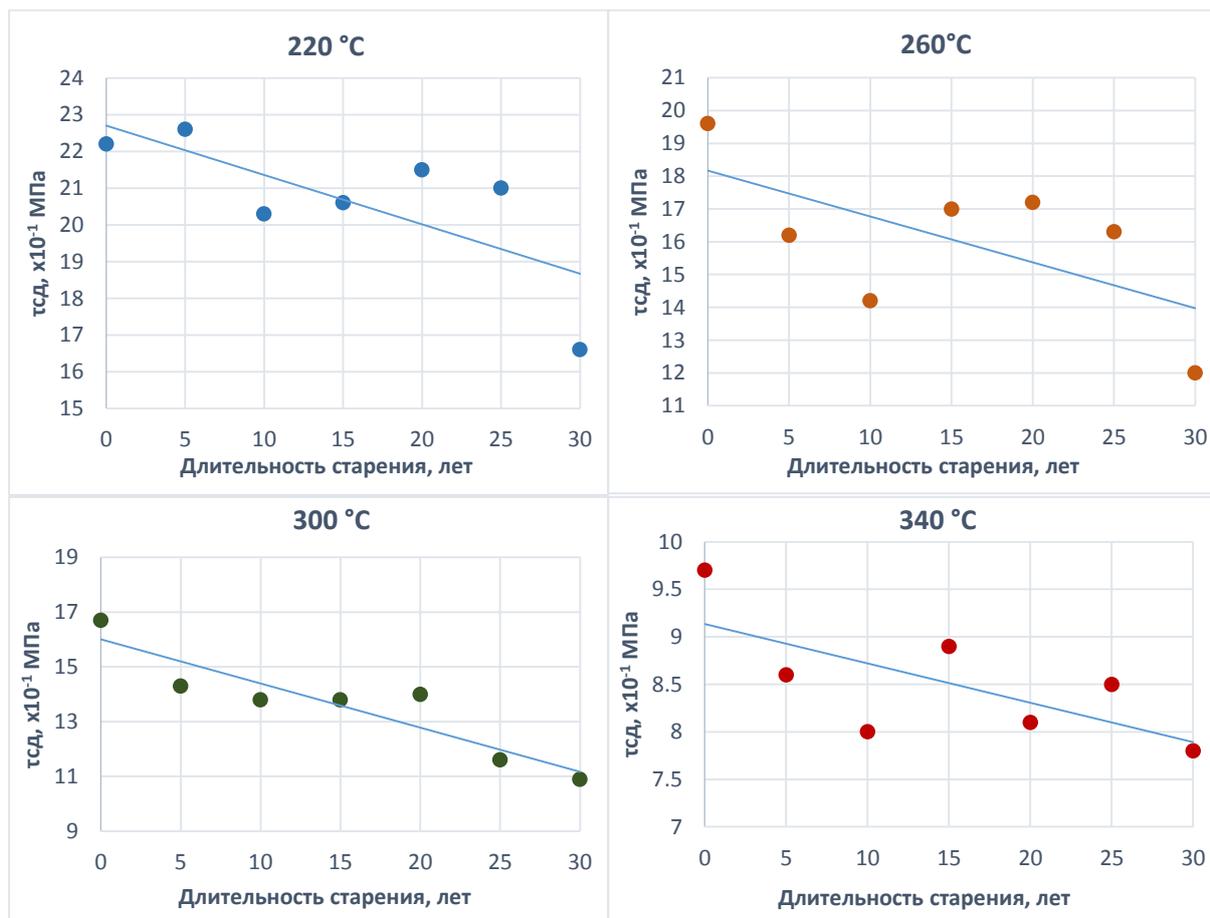
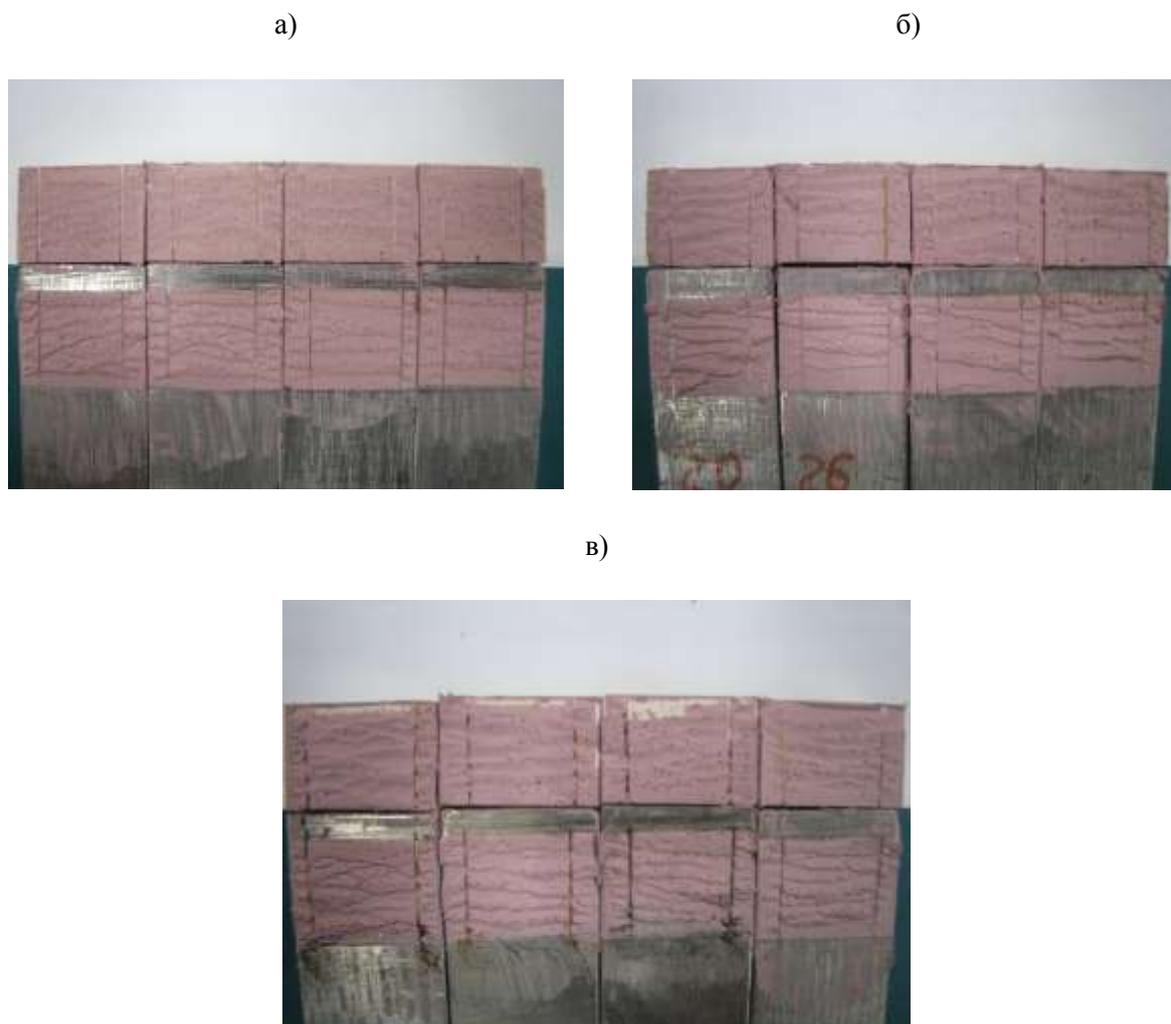


Рис. 2 – Кинетика деградации прочности при сдвиге КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ в процессе длительного хранения



a – исходные (до старения); *б* – после 10 лет старения; *в* – после 30 лет старения
Рис. 3 – Внешний вид образцов после разрушения при температуре 220°С

Из рис. 2 видно, что кинетика деградации прочности при сдвиге КС на основе герметика Висконт У-2-28НТ в диапазоне температур от 220°С до 340°С в процессе ускоренного климатического старения с достаточной точностью может быть аппроксимирована линейной зависимостью. При этом прочность при сдвиге КС за весь период старения в зависимости от температуры испытаний снижается на величину от 19,5 до 38,8%, что может иметь существенное значение при прогнозировании работоспособности КС в конструкции ЛА.

Однако специфика эксплуатации элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов предполагает продолжительное

теплосиловое воздействие на узлы и агрегаты, входящие в состав конструкции, в том числе и на клеевые узлы соединения. В связи с этим, для оценки работоспособности КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ проводились экспериментальные исследования зависимости долговечности (времени до разрушения) КС при повышенных температурах в условиях квазистатического теплосилового воздействия соответствующего эксплуатационному.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости долговечности КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ от напряжения сдвига при температурах от 200°C до 340°C до климатического старения, полученные в ранее проведенных авторами работах [5].

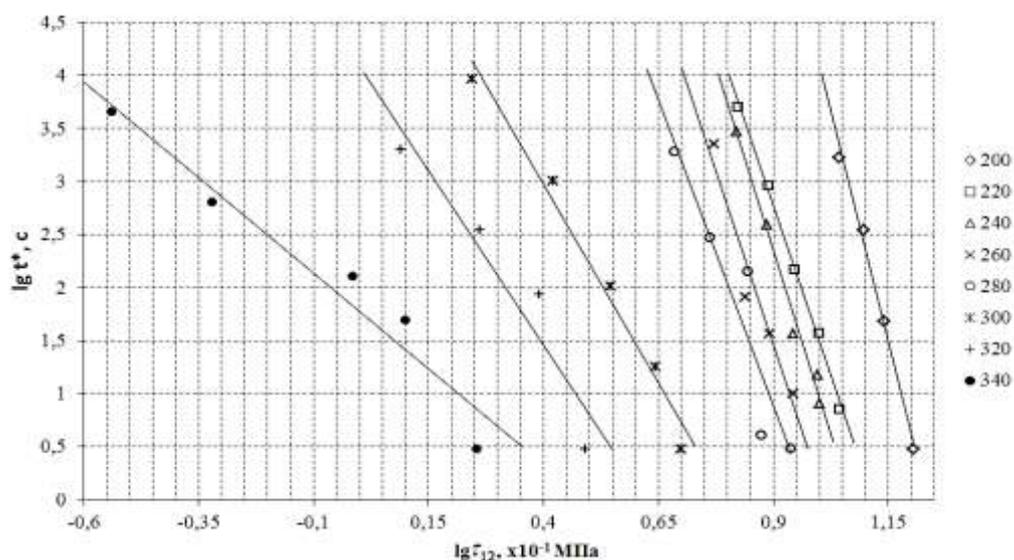


Рис. 4 – Экспериментальные зависимости долговечности КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ от параметров теплосилового нагружения (до старения)

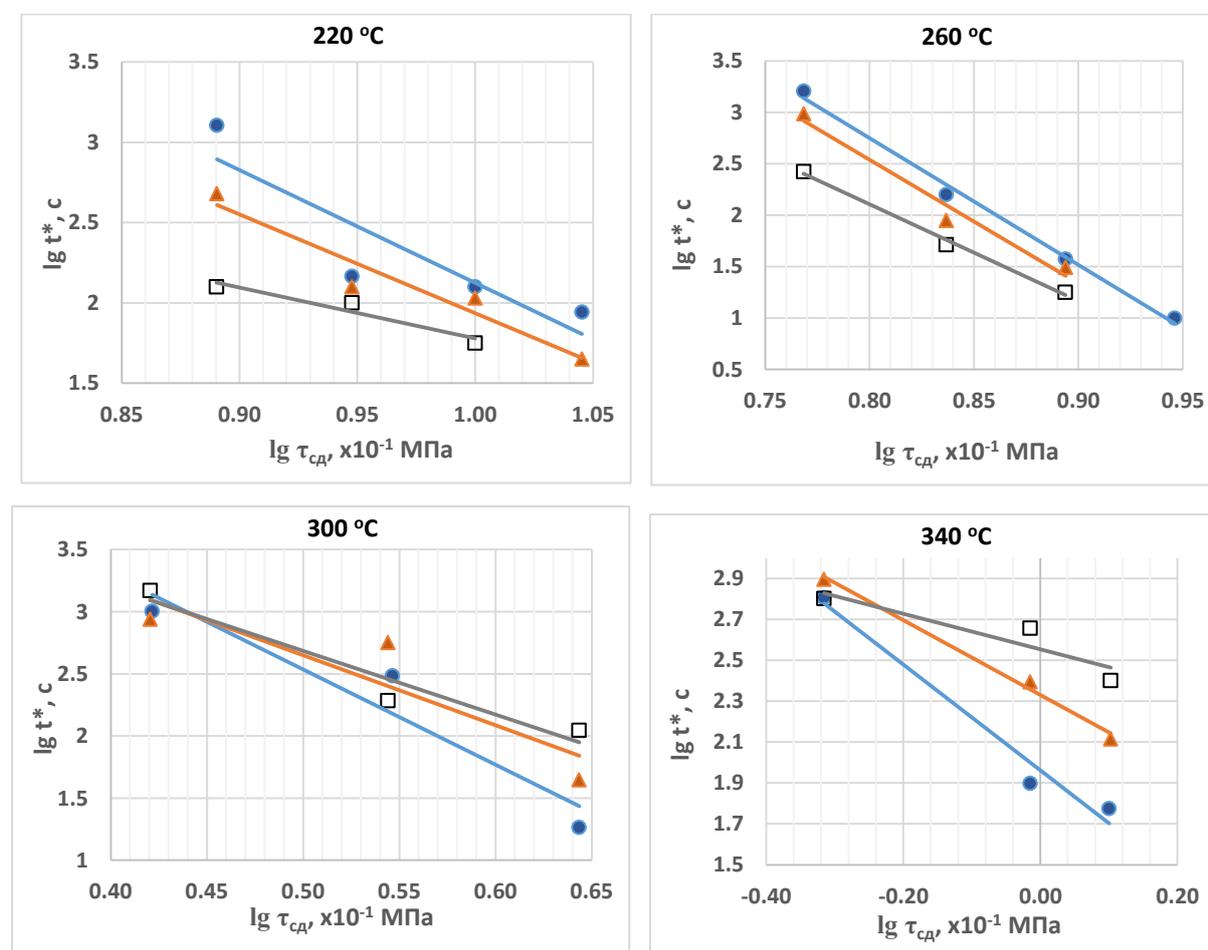
В работе [6] для описания зависимостей представленных на рис. 3 предложена математическая модель долговечности КС в условиях воздействия повышенных температур и сдвигового напряжения, имеющая следующий вид:

$$lgt^* = lga_T + Q \cdot lgt_{сд} - P \quad (2)$$

где Q , P – параметры адгезива (герметика); a_T – коэффициент температурно-временной редукции, определяемый исходя из соотношения Вильямса-Ландела-Ферри (WLF).

Соотношение (2) с удовлетворительной точностью позволяет прогнозировать время до разрушения КС при его квазистатическом теплосиловом нагружении.

На рис. 5 приведены зависимости долговечности КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ, полученные после проведения ускоренного климатического старения, соответствующего хранению в отапливаемых хранилищах в течение 5 и 10 лет.



- – исходные значения (до старения); ▲ – после старения в течение 5 лет;
- – после старения в течение 10 лет

Рис. 5 – Экспериментальные зависимости долговечности КС на основе герметика Виксинт У-2-28 от величины сдвигового напряжения при соответствующих повышенных температурах испытаний

Анализ полученных результатов (рис. 5) показывает, что в процессе климатического старения КС на основе герметика Виксинт У-2-28НТ в логарифмической плоскости сохраняется линейный характер зависимости между долговечностью КС и величиной напряжения сдвига в диапазоне температур от 220°С до 340°С. Что позволяет использовать соотношение (2) в качестве определяющего соотношения для прогнозирования долговечности КС в условиях теплосилового нагружения с учетом фактора старения. Однако необходимо отметить, что при температурах 300...340°С характер влияния климатического старения на долговечность КС меняется. Из рис. 4 *в, г* видно, что при температурах 300...340°С с увеличением длительности климатического старения при равных значениях сдвигового напряжения наблюдается и увеличение долговечности КС. Это может быть связано со структурными изменениями герметика Виксинт У-2-28НТ при температурах свыше 300°С и будет являться предметом отдельного исследования. Для разработки адекватной математической модели долговечности КС с учетом фактора старения герметика требуется дополнительные экспериментальные данные полученные на образцах после климатического старения от 10 до 30 лет.

Результаты и выводы

В результате проведенных работ получены экспериментальные зависимости прочности при сдвиге КС на основе эластомерного герметика Виксинт У-2-28НТ в условиях повышенных температур от 220°С до 340°С, соответствующих эксплуатационным, от длительности климатического старения в условиях отапливаемого железобетонного хранилища до 30 лет.

Установлен характер зависимости долговечности (времени до разрушения) исследуемых КС при квазистатическом теплосиловом нагружении от длительности климатического старения. Полученные результаты могут быть использованы в расчетах для прогнозирования работоспособности клеевых соединений на основе эластомерного

герметика Виксинт У-2-28НТ при проектировании и разработке конструкций летательных аппаратов, подвергающимся в процессе эксплуатации комплексным продолжительным воздействиям повышенных температур и силовых нагрузок.

Литература

1. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. 239 с.

2. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: Учебное пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 64 с.

3. ГОСТ 9.707 – 81 ЕСЗКС. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний.

4. Меркулова В.М., Барановская Н.Б. и др. Ускоренное определение ресурса кремнийорганических герметиков. В сб. «Герметизирующие материалы», М.: ОНТИ, 1967.

5. Терехин А.В., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Думанский А.М. Работоспособность эластомерных клеевых соединений конструкций летательных аппаратов в условиях продолжительного теплосилового воздействия // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. Т.21. №4. С. 599–609.

6. Терехин А.В., Неповинных В.И., Русин М.Ю., Думанский А.М. Исследование долговечности эластомерных клеевых соединений в конструкциях летательных аппаратов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т.81. №5. С. 44–48.

УДК 629.7.017.1:620.193

Допустимость коррозионных повреждений авиационных конструкций

Тимофеев А.Н.¹

A.Timofeev@sibnia.ru

¹ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск

Аннотация:

Анализируются возможности выполнения требований Норм летной годности о практической невероятности предельного состояния и ее подтверждения в известных подходах к допустимости коррозионных повреждений, предлагается решение задачи.

Ключевые слова:

авиационные конструкции, коррозия, допустимость повреждений, ресурс.

Условия допустимости коррозионных повреждений (КП), естественным образом способных возникнуть и развиваться до момента обнаружения при очередном осмотре в конструкции воздушного судна (ВС), определены Методами определения соответствия (МОС) исходя из основополагающих требований к прочности Норм летной годности [1, п. 3.1]: “Должно быть обеспечено и подтверждено, что повреждения конструкции, которые могут непосредственно привести к аварийной или катастрофической ситуации, в пределах ограничений, устанавливаемых в эксплуатационной документации, практически невероятны”.

Известны следующие подходы к определению допустимых размеров КП:

- 1 по опыту эксплуатации [2],
- 2 заменой коррозионного повреждения эквивалентной трещиной [3],
- 3 равной вероятности усталостного разрушения по критическому месту и по повреждению [4],
- 4 равенства эффективных коэффициентов концентрации напряжений элемента с повреждением и критического места конструкции [5].

Требования практической невероятности и ее подтверждения выполнимы при замене КП трещиной для конструкций, безопасность которых обеспечивается по принципу допустимости повреждений, но за счет увеличения частоты осмотров, затрат на техническое обслуживание и ремонт, и не выполнимы таким приемом для конструкций, эксплуатирующихся по принципу безопасного ресурса.

При определении допустимости КП по опыту эксплуатации распространить опыт можно только на точно такие же повреждения. Для КП, отличающихся видом коррозии, формой, положением и (или) условиями работы детали в конструкции, это становится проблематичным. Доказательство практической невероятности предельного состояния (10^{-3} на срок службы гражданского самолета и $5 \cdot 10^{-3}—10^{-2}$ на срок службы для военных самолетов [6]) методами математической статистики возможно только при соответствующих значительных объемах выборок. Практикой нельзя выявить пределы допустимости.

Четвертое предложение фактически сводится к третьему — равной вероятности усталостных разрушений от повреждения и от критического конструктивного концентратора напряжений. Однако обозначив вероятности этих совместных событий, соответственно, $P(\Pi)$, $P(K)$ и P как

исходную для сравнения вероятность разрушения неповрежденной конструкции, получим вероятность для конструкции с повреждением

$$p = P(\Pi) + P(K) - P(\Pi) \cdot P(K) = P(2 - P),$$

т. е. происходит увеличение вероятности разрушения (примерно в два раза при малых вероятностях и в полтора при равенстве долговечностей зон концентратора и повреждения, соответствующих вероятности разрушения 0,5).

Данная ситуация имеет место, когда конструкция до появления повреждения не имеет наработки и эксплуатируется, теоретически, до разрушения с вероятностью p по критическому месту или повреждению. Снижения безопасности может не быть при более коротких интервалах между осмотрами, при которых повреждение должно быть обнаружено и эксплуатация ВС остановлена, т. к. усталостная наработка зоны повреждения по условию периодичности контроля не может превышать длительности интервала. Но возникает вопрос: при какой наработке в эксплуатации и при какой длительности интервала между осмотрами уровень безопасности конструкции не будет снижен? Снижение ниже нормативного уровня недопустимо, а для каждого потенциально опасного случая необходимо подтверждение безопасности.

Из требования практической невероятности следует необходимость использования вероятностных методов для оценки допустимости. Это, в свою очередь, требует знания функции распределения долговечности для каждого случая повреждения. Определение такой функции по выборке эксплуатационных КП или по результатам усталостных испытаний с моделированием КП и условий работы материала в конструкции выполнимо известными статистическими методами, если вид и величину повреждения связать с долговечностью поврежденного элемента. Известен

ряд мер — геометрических параметров КП — для измерения их величины с целью оценки усталостной долговечности (таблица 1).

Таблица 1

Определяющие долговечность параметры коррозионного повреждения

Авторы модели	Год	Вид повреждения	Параметры	Материал
Павлов [7]	1949	язва	глубина	Д1, Д16Т
Воронкин [3]	1962	язва	глубина и диаметр	Д16Т
Зайка, Радченко [8]	1972	равномерная	глубина	Д16Т, Д16АТ, Д16АТВ
ЦИАМ [10]	1984	язва	глубина (диаметр)	—
Дубинин, Тимофеев [11]	1991	язва, расслаивающая коррозия (РСК)	площадь миделя	Д16Т, 1163Т, Д16АТВ, В95Т1
Лебедева [12]	1992	язва	диаметр (глубина)	сталь 20Х13
Perez *	1997	питтинг	глубина и расстояние между питтингами	7075-Т7451, лист 6,35 мм; 2124-Т851, лист 6,35 мм
Perez*	1997	питтинг	глубина наиболее крупного питтинга	—
Scheuring, Grandt*	1999	питтинг	глубина и неровность поверхности	2024-Т, лист 2,2 мм
Tuegel, Mills*	2002	питтинг	потеря массы	7075-Т6, лист
Sharp Clark et al *	2000	РСК	глубина + межкристаллитная трещина	2024-Т351, лист 6мм; 7075-Т651, лист 6мм
Komorowski *	1997	каверна (язва)	объем продуктов коррозии/глубина	—
Bellinger*	2001	питтинги	средняя глубина	плакированный 2024-Т3
Mills*	2002	питтинги	глубина питтинга и топография поверхности	—
Whaley*	2001	каверна	глубина и площадь	плакированный 2024-Т3
Birt et al [14]	2007	питтинг	глубина или площадь сечения	плакированный 2024-Т3
Зубарев и др. [15]	2007	язва	глубина или объем	1163Т
Акопян, Лапаев и др. [5]	2008	язва	глубина или объем, или максимальный теоретический коэффициент концентрации напряжений (K_t)	Д16чАТ

* — первоисточники указаны в работе [13]

Для моделей таких повреждений, показанных на рис. 1 и характеризующихся соотношениями общих размеров, методом конечных элементов в работе [16] выполнены расчеты концентрации напряжений (рис. 2).

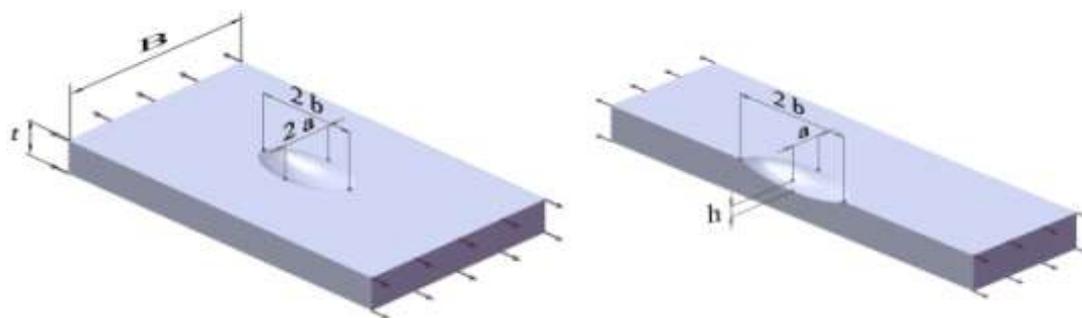


Рис.1 – Модели коррозионных язв на поверхности и кромке элемента

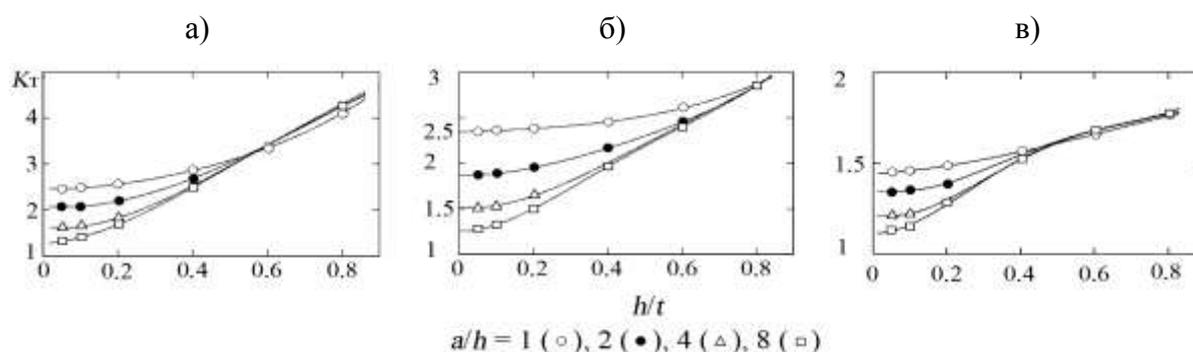


Рис. 2. Зависимости максимального теоретического коэффициента концентрации напряжений (K_t) от относительной глубины и отношения ширины к глубине кратера типа показанных на рис. 1: а – $b/a = 0.5$; б – $b/a = 1$; в – $b/a = 2$

С учетом полученных зависимостей становится видна несовместимость большинства предлагаемых в таблице 1 мер коррозии в отношении влияния на усталостную долговечность при изменениях формы повреждения. Например, при удлинении кратера в направлении действия нагрузки или увеличении его ширины концентрация напряжений снижается, что согласно критерию максимальной концентрации напряжений должно бы приводить к увеличению усталостной

долговечности, но объем и масса корродированного металла при этом растут, а это в соответствии с выводами исходных работ должно снижать долговечность. Критерий “глубина” при тех же условиях может оставаться неизменным. По результатам экспериментов [4, 17] глубина, как и максимальный теоретический коэффициент концентрации напряжений (определяемый без учета неровности корродированной поверхности), не являются единым определяющим долговечность параметром даже для язв осесимметричных форм с различной крутизной склонов. Противоречий не возникает только при измерении подобных по форме повреждений, но в этом случае, в силу функциональной зависимости, любой геометрический параметр полностью определяет все остальные размеры. Из этого следует, что применение таких параметров для измерений повреждений, формы которых отличаются от используемых для сравнения (полученных из опыта эксплуатации или в эксперименте), может приводить к неверным оценкам долговечности. Для характеристики наблюдаемых в реальных условиях вариаций форм повреждений и видов коррозии необходим более универсальный параметр. Из известных мер этому условию в наибольшей степени удовлетворяют площадь миделя повреждения F и для металла разной толщины — параметр $f = F \cdot t^2$ [18, 19].

Предлагаемое решение

По результатам экспериментальных исследований поверхностных и кромочных повреждений типа питтингов, коррозионных язв и очагов расслаивающей коррозии в конструкционных алюминиевых сплавах [11, 19, 20] искомая функция может быть задана линейной регрессией усталостной долговечности зоны повреждения по моменту зарождения трещины (N_1) вида $Y(f) = a + b(\lg f - x)$, где $Y(f) = \lg N_1(f)$, a , b , x — параметры, определяемые по стандартной методике регрессионного анализа, и зависимостью от размера повреждения среднеквадратичного отклонения логарифма долговечности $sf(f)$. Такие данные могут быть

получены на образцах материала конструкции с КП при усталостных испытаниях с моделированием спектра эксплуатационных напряжений и коррозионных воздействий в зоне оцениваемого повреждения.

В соответствии с [1, п. 6.1] критерием летной годности ВС по условию длительной прочности является наличие допустимой длительности безопасной эксплуатации в пределах наработки, установленной по принципу безопасного ресурса, или допустимой наработки до начала осмотров, интервалов между осмотрами и установленной допустимой наработки в эксплуатации. Вследствие этого при периодичности контроля допустимыми могут быть повреждения, вообще не снижающие остаточный на момент обнаружения повреждения ресурсный потенциал конструкции или соответствующие допустимой по определениям Норм наработке, достаточной для продолжения эксплуатации, по меньшей мере, до момента планового осмотра и ремонта.

Возможность выполнения первого условия допустимости обусловлена тем, что авиационные конструкции содержат значительное число конструктивных концентраторов напряжений и с точки зрения сопротивления усталости не являются равнопрочными: усталостное разрушение обычно происходит по заклепочным швам, болтовым соединениям, недостаточно подкрепленным вырезам, отверстиям и другим концентраторам напряжений. Гладкие участки обшивок, силового набора и некритические нерегулярности конструкции имеют некоторый запас усталостной долговечности в сравнении с критическими по сопротивлению усталости местами. Запас может быть снижен коррозией в пределах сохранения ресурса (допустимой наработки) всей конструкции. Этот факт (толерантность авиационных конструкций к КП) хорошо известен [21]. Необходимо установить размеры таких повреждений.

Второе условие является следствием того, что уровень безопасности усталостно нагружаемой конструкции снижается по мере выработки располагаемого ресурса и потому до достижения нормируемого предела обычно имеется запас наработки, который может быть снижен коррозией.

При обнаружении КП при очередном осмотре в одном из ответственных элементов конструкции можно предполагать его возникновение в любой момент отработки предшествующего осмотру интервала и дальнейший рост до момента обнаружения. Крайними случаями являются появления полноразмерных повреждений сразу перед текущим или после предшествующего осмотров. Первому случаю соответствует величина остаточного ресурса конструкции на момент обнаружения повреждения. Во втором случае до обнаружения повреждения вырабатывается часть ресурса, поэтому заведомо консервативной будет оценка по условию возникновения повреждения сразу после предшествующего осмотра.

С появлением повреждения становится возможным, после отработки после этого события N_1 циклов, усталостное разрушение конструкции ВС по конструктивному критическому месту с вероятностью $P(K)$ или (и) от повреждения с вероятностью $P(\Pi)$. Задаваясь условием практической невероятности разрушения от повреждения $P \Pi = k \cdot P$, $k \ll 1$, два условия допустимости сводятся [20] к решениям двух вероятностно-статистических уравнений:

$$f = 10^{\frac{z(\frac{P}{1-kP}, M_{i-1}, sh) - z(kP, 0, sf(f)) - a}{b} + x}, \quad (1)$$

$$P = F_n(y, M_i, sh) + F_n(y, Y f, sf f) - F_n(y, M_i, sh) \times \\ \times F_n(y, Y f, sf(f)). \quad (2)$$

В уравнениях z Вер, МО, СКО — квантиль нормального распределения с математическим ожиданием МО и стандартным отклонением СКО для вероятности Вер; $F_n(y, МО, СКО)$ — функция вероятности

нормального распределения с математическим ожиданием M_0 и стандартным отклонением СКО; M_i — математическое ожидание логарифма усталостной долговечности критического места конструкции, определяющего ресурс ВС в отсутствие повреждения, на момент i -го осмотра и sh — соответствующее ему среднеквадратичное отклонение. $M_i = M_0 - \sum_{j=1}^i \lg(\Delta N_j)$, где M_0 — математическое ожидание на начало эксплуатации ВС — устанавливается по результатам испытаний натуральных конструкций или исходя из ресурса ВС, ΔN_j — число циклов наработки в интервале перед j -м по порядку осмотре.

Уравнение (1) устанавливает величину повреждения (f) , не снижающего усталостную долговечность. Решение уравнения (2) относительно аргумента $y = \lg(N1)$ — усталостную долговечность поврежденной конструкции с заданной вероятностью разрушения P , т. е. фактически остаточный ресурс конструкции.

Решения уравнений (1) и (2) при реальных значениях статистических параметров имеют особенности, позволяющие значительно упростить процедуры оценки допустимости. На рис. 3 представлены результаты расчетов и испытаний [22] случая повреждения коррозией кромки нижней полки штампованного лонжерона крыла, усталостная долговечность которой в неповрежденном состоянии определяется отверстиями под болты крепления нижней панели. Решения уравнений в виде параметрических зависимостей от относительной вероятности разрушения от повреждения $P(\Pi)/P$, вероятности разрушения полки P и уровня максимального напряжения отнулевого цикла напряжений в полке (σ_{\max}) представлены, соответственно, на рис. 3, а, в, д и 3, б, г, е. На осях размеров отмечены значения $f_{0.01}$ параметров допустимых по (1) повреждений. Индекс 0.01 соответствует принятым при расчете значениям $P(\Pi)/P = 0.01$ и $P = 0.01$, индекс 0,5 — определению допустимой величины повреждения по условию равенства эффективных коэффициентов

концентрации напряжений. В последнем случае долговечность существенно снижена.

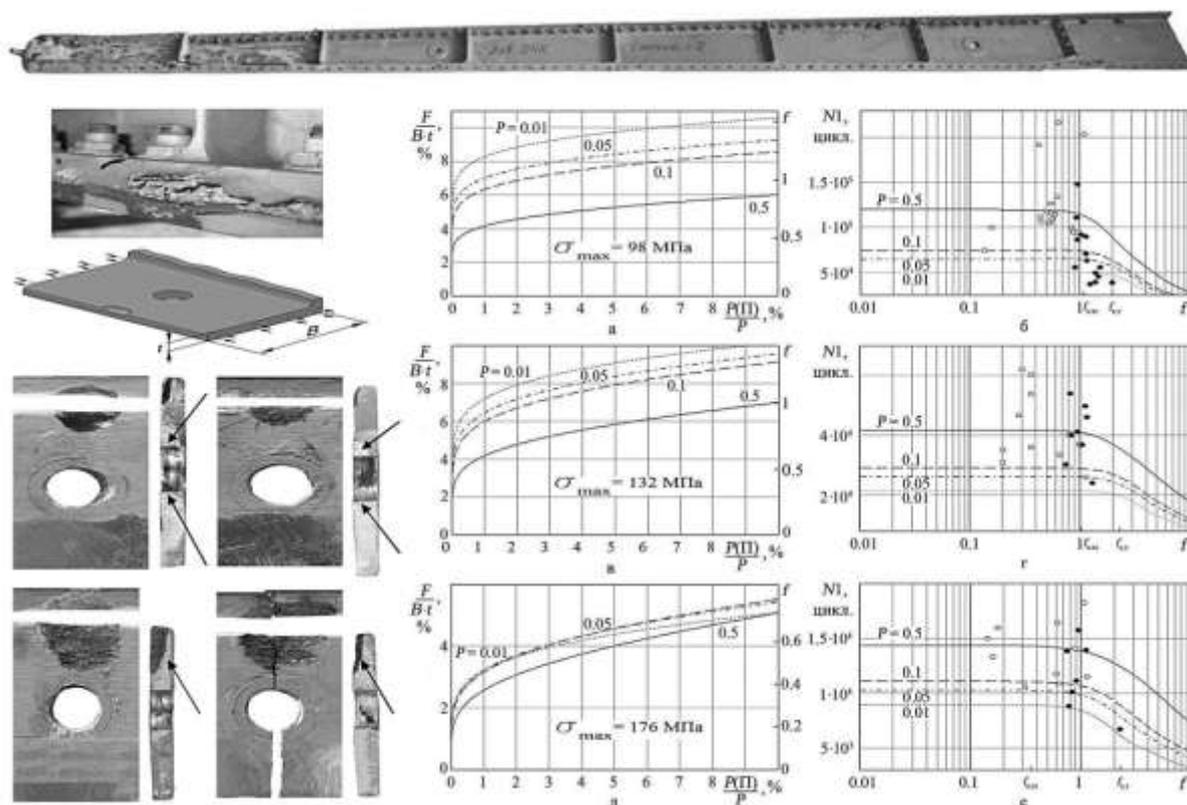


Рис. 3 – Допускаемые по условию невлипания на усталостную долговечность лонжерона относительные площади сечения кромочных коррозионных повреждений полок (а, в, д), зависимости долговечности полок от величины повреждения (б, г, е) и результаты испытаний полок с повреждениями при уровнях циклических брутто-напряжений $\sigma_{max} = 98$ (а, б), 132 (в, г), 176 (д, е) МПа. Темные символы – разрушения (очаги указаны стрелками) от КП, светлые – от отверстий

Наблюдаемый факт снижения допускаемой величины повреждения с повышением вероятности разрушения конструкции (объяснение парадокса дано в работе [20]) позволяет обойти известную сложность определения фактического поведения законов распределения усталостной долговечности в диапазонах, определяющих вероятности, близкие к нулю (и к единице), где оно может сильно отличаться от классических экстраполяций в эти области. Вероятность 10^{-2} и выше, приемлемая по числу испытываемых образцов материалов и элементов конструкций,

в этом случае обеспечивает по условию консервативности более высокие уровни безопасности.

Другой подход к выбору ресурсной базы для определения допустимости КП в конструкции следует из данного в работе объяснения данного факта: требования к допустимому повреждению ужесточаются, если сравнивать зону повреждения с элементом более выносливым, чем критический элемент конструкции.

Выводы

1. В конструкции планера самолета могут присутствовать значительные коррозионные повреждения, не снижающие его ресурс. Размеры таких повреждений увеличиваются по мере выработки ресурса.

2. Базой для определения допустимости КП может являться назначенный ресурс ВС, характеристики распределения долговечности критического места конструкции или, с условием консервативности оценки, — характеристики заведомо более выносливого элемента.

Анализом допустимости повреждений по результатам очередного осмотра устанавливается вид технического состояния поврежденной конструкции: работоспособна ли она на момент обнаружения КП? — и его прогноз на планируемый этап эксплуатации.

3. Предлагаемое решение задачи соответствует требованиям Норм летной годности по обеспечению и подтверждению практической невероятности предельного состояния при повреждениях коррозией.

Литература

1. Методы определения соответствия. Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции: проект МОС 25.571-1А / ЦАГИ. 2008. 94 с.

2 Стрижиус В.Е. Нормативные требования, теория и практика разработки программ контроля и предупреждения коррозии конструкции

транспортных самолетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 134–140.

3 Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И. Живучесть самолетных конструкций // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 57–69.

4 Карлашов А.В., Воронкин Н.Ф. Влияние коррозионных поражений и агрессивной среды на выносливость листового дуралюмина // ФХММ. 1969. № 5. С. 529–532.

5 Теория и практика оценки коррозионных повреждений элементов конструкции планера воздушных судов. / К. Э. Акопян [и др.]. М.: ЗАО «Научный центр по поддержанию летной годности воздушных судов ГосНИИ ГА», 2010. 288 с.

6 Чижов В.М., Турчанников Г.И. Анализ возможного снижения коэффициентов безопасности // Труды ЦАГИ. 2013. Вып. 2721. 24 с.

7 Павлов С.Е. Коррозия дуралюмина. М.: Оборонгиз, 1949. 211 с.

8 Зайка А.Я., Радченко А.И. К вопросу разработки критериев технического состояния элементов тонкостенных конструкций, пораженных коррозией // Прочность и долговечность авиационных конструкций: сборник трудов КИИГА. Киев: КИИГА, 1972. Вып. 5. С. 46–50.

9 ОСТ 1 02506-84. Лопатки компрессоров авиационных газотурбинных двигателей. Использование лопаток, поврежденных коррозией. Введ. 1984—04—10. М: ЦИАМ. 1984. 8 с.

10 ОСТ 1 02569-85. Двигатели газотурбинные. Методы расчетов пределов выносливости деталей. Введ. 1985—12—12. М: ЦИАМ. 1985. 25 с.

11 Дубинин В.В., Тимофеев А.Н., Паулова Л.П. К вопросу оценки допустимой величины коррозионных поражений в регулярных зонах силовой конструкции // Вопросы авиационной науки и техники. Серия: Аэродинамика и прочность летательных аппаратов: научн. техн. сб. /

СибНИА. Новосибирск: СибНИА, 1991. Вып.1: Сопротивление усталости и живучесть авиационных конструкций. С. 136–142.

12 Влияние язвенной коррозии на сопротивление усталости лопаточных материалов / А.И. Лебедева [и др.] // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 11–14.

13 NDE corrosion metrics for life prediction of aircraft structures / Birt E.A., Jones L.D., Nelson L.J., Smith R.A. // Insight. 2006. Vol. 48, No 3. P. 139–143.

14 Correlation of fatigue life with potential NDE corrosion metrics / Birt E.A., Nelson L.J., Brown K., Jones L.D. et al. // Insight. 2007. Vol. 49, No 7. P. 402–408.

15 Зубарев А.П., Лапаев А.В., Лапаев В.П. Использование обобщенного параметра коррозионного поражения для оценки долговечности элементов конструкций с коррозионными поражениями // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 30–32.

16 Белов В.К., Тимофеев А.Н. Анализ характеристик коррозионных повреждений, необходимых для оценки остаточной усталостной долговечности авиационных конструкций // Авиационная промышленность. 2011. № 3. С. 37–42.

17 Murakami Y. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Amsterdam: Elsevier, 2002. 365 p.

18 Тимофеев А.Н. Критерии коррозионного состояния авиационных конструкций // Научный вестник НГТУ, 2008. № 4. С. 141–154.

19 Тимофеев А. Н., Корелина О. В. Резервы работоспособности конструкций авиационной техники с коррозионными повреждениями // Авиационная промышленность. 2010. № 3. С. 43–48.

20 Тимофеев А.Н., Белов В.К. Математическая модель допустимости коррозионных повреждений конструкций, нагружаемых переменными

нагрузками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 39–45.

21 Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 183. С. 83–91.

22 Тимофеев А.Н., Белов В.К., Корелина О.В. Оценка допустимости коррозионного повреждения элемента конструкции // Авиационная промышленность. 2012. № 2. С. 49–53.

УДК 66.018.8

Применение неразрушающего контроля при проведении натуральных климатических испытаний

Титарева А.С.¹

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва (ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова)*

Аннотация:

Обсуждается применение неразрушающих методов контроля при проведении климатических испытаний

Ключевые слова:

неразрушающий контроль.

Для каждого типа воздушного судна цикличность воздействия климатических и эксплуатационных механических факторов индивидуальна – гражданское воздушное судно большую часть времени проводит в полете, военное – на земле. Для прогнозирования срока службы собственно материала проводят испытания в несколько этапов: сначала на элементарных образцах, затем на конструктивно подобных элементах, на макете конструкции и последний этап испытаний заключается в наблюдении, обследовании и проверке состояния материалов в составе «лидерного» ВС [2]. Основными видами испытаний изделий и образцов материалов являются натурные климатические испытания на открытых атмосферных площадках климатических станций, находящихся в

различных климатических поясах, позволяющих оценить коррозионное поведение материалов в условиях хранения на земле, и ускоренные (лабораторные) коррозионные испытания, которые позволяют оценить стойкость материалов при воздействии искусственно созданных эксплуатационных факторов (высокие и пониженные температуры, термоудар, воздействие солевого тумана и пр.).

Надежность и весовая эффективность относятся к основным, определяющим признакам пригодности материала для применения в авиации.

Каждая конкретная деталь может быть изготовлена с теми или иными отступлениями от нормативной документации. Например, в любом слитке могут оказаться включения и множество других локальных дефектов, которые затем перейдут в полуфабрикат, заготовку и т.д. Выявить эти дефекты на различных стадиях технологического процесса, не разрушая деталь, – задача не из легких [3].

Однако, НД на методы НК, в основном, регламентируют порядок проведения НК. НД на методы проведения климатических испытаний предусматривают оценку физико-механических, металлографических, теплофизических свойств материалов, но не предусматривают возможность обнаружения дефектов, образовавшихся в результате воздействия климатических факторов. Хотя известно, что методы НК широко применяются при анализе состояния воздушного судна в процессе эксплуатации. Можно сделать вывод, что необходимо отработать методики и разработать НД на оценку свойств образцов материалов в ходе климатических испытаний с применением НК.

Важную роль неразрушающий контроль играет на этапах климатической квалификации материалов авиационного назначения:

– при испытаниях элементарных образцов – неразрушающий контроль коррозионных поражений позволяет оценивать изменения свойств материала под воздействием внешних факторов,

– при оценке стойкости контактных пар разнородных соединений и крепежа – контроль зарождения и распространения дефекта,

– при испытаниях конструктивно-подобных образцов – позволяет оценивать живучести конструктивных элементов в условиях циклических нагрузок,

– при испытаниях элементов конструкций – позволяет оценивать ресурс реальной конструкции в условиях одновременного воздействия нагрузок эксплуатационного характера и атмосферных факторов с неразрушающим контролем скорости распространения дефектов.

Межкристаллитная коррозия (МКК) является концентратором напряжений при приложении механической нагрузки и становится основной причиной снижения вязкости разрушения материала.

Согласно ГОСТ 9.908 п.2.3.3 максимальную глубину проникновения питтинговой коррозии находят как среднее арифметическое измерений наиболее глубоких питтингов в зависимости от их количества (n) на поверхности: при $n < 10$ измеряют 1—2 питтинга,

при $n < 20$ —3—4,

при $n > 20$ —5

Недостатки металлографического метода:

– низкая точность при изготовлении микрошлифа;

– высокая трудоемкость изготовления образцов.

На сегодняшний день отсутствуют методы определения глубины МКК неразрушающими методами контроля с высокой точностью измерения, которые можно было бы использовать при проведении плановых осмотров изделий авиационной техники. Однако проведенные

исследования показывают, что вихретоковый метод (ВТМ) контроля может быть использован для контроля МКК в алюминиевых сплавах.

Перспектива применения вихретокового метода контроля в установлении коэффициентов соответствия реальной глубине МКК для каждого сплава с целью последующего применения вихретоковой дефектоскопии для неразрушающего контроля конструкций из алюминиевых сплавов, склонных к МКК.

Также применение лазерной сканирующей микроскопии позволяет проводить исследования неразрушающим методом (рис. 1), что повышает точность измерений и снижает трудоемкость испытаний.

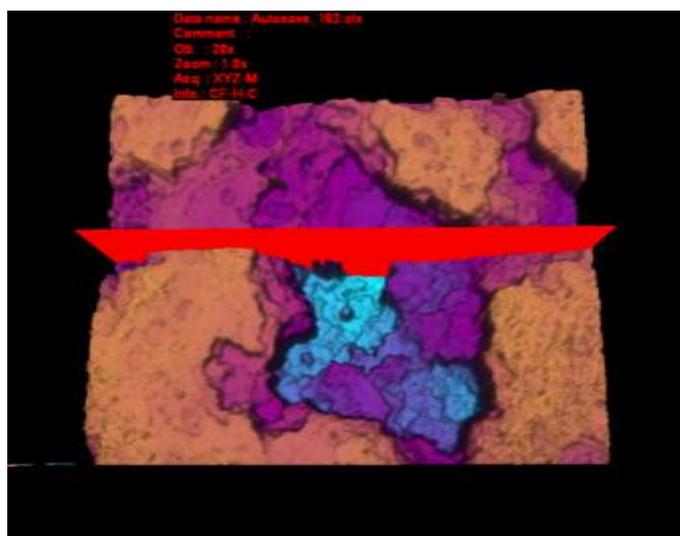


Рис. 1 – 3D изображение участка поверхности с коррозионным поражением образца алюминиевого сплава.

На базе ГЦКИ проводятся исследования поведения материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем ЛКП, в условиях умеренно теплого климата.

В рамках проведения испытаний лопасти несущего винта вертолета (рис. 2) проводятся акустический неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов, примененных в составе конструкции

лопасти при воздействии статических нагрузок и климатических факторов в условиях умеренно теплого климата.



Рис. 2 – Лопасть несущего винта вертолета Ми-28Н

Лопасти воздушного винта являются чрезвычайно ответственными деталями, от надежности которых зависит жизнь людей и сохранность больших материальных ценностей. К наиболее актуальным проблемам повышения надежности изделий авиационной техники относится повышение их качества как главного показателя оценки изделий ответственного назначения. Весьма эффективно повышение надежности летательных аппаратов неразрушающими методами выявления нарушений сплошности материалов ответственных деталей [4].

Применение неразрушающего контроля при проведении климатических испытаний конструкций помогает оценивать стойкость элементов конструкции к воздействию климатических факторов.

Проведение только климатических испытаний либо только ресурсных испытаний не позволяет оценить стойкость материалов конструкций, к эксплуатационным факторам в части одновременного климатического и механического воздействия. Проведение испытаний при одновременном воздействии различных факторов создает условия приближенные к эксплуатационным.

В ГЦКИ также проводятся испытания полномасштабных элементов конструкций в условиях, имитирующих эксплуатационные, т.е. под воздействием климатических факторов, присущих реальным условиям эксплуатации и воспроизведением механических нагрузок эксплуатационного уровня.

Проведение таких испытаний с привлечением методов неразрушающего контроля позволяет оценить:

- Стойкость элементов конструкции к воздействию климатических факторов, совмещенных с механическим нагружением.
- Стойкость к коррозии и старению материалов в составе разнородных соединений и элементов крепежа.
- Остаточную долговечность конструкции.

В заключении можно отметить, что применение неразрушающих методов контроля при проведении климатических испытаний материалов и элементов конструкций позволят повысить точность и информативность исследований стойкости материалов к агрессивному воздействию внешних факторов, в ряде случаев сокращает трудоемкость и, как следствие, затраты на проведение исследований. Также немаловажна необходимость актуализации системы нормативной документации в части применения неразрушающего контроля при проведении климатических испытаний.

Литература

1. Авиационные правила Часть 23 Нормы летной годности гражданских легковых самолетов.

2. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор// Вопросы материаловедения. 2016. № 3(87). С. 126–137.

3. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества открытий / под общ. ред. Е.Н. Каблова – М.: Наука, 2007 с. 197.

4. А.С. Бакунов, В.В. Мурашов, А.М. Сысоев Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики Контроль. Диагностика 2012 № 6 с. 17.

5. С.В. Панин, О.В. Старцев, А.С. Кротов, И.М. Медведев, А.С. Фролов Коррозия и старение поверхности конструкционных материалов по данным 3d микроскопии Труды ВИАМ 2014 № 14 с. 4.

6. М.Г. Курс, Антипов В.В., Луценко А.Н., А.Е. Кутырев, Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов Авиационные материалы и технологии 2016 № 3 (42) С. 24–32.

7. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Направления исследований в области защиты от коррозии, старения и биоповреждения материалов сборник Климат-2017 (Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции: посвящена 120-летию со дня рождения великого советского ученого, авиаконструктора Роберта Людвиговича Бартини). 2017. С. 46 –54.

8. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 547–561.

УДК 551.508+620.1

**Разработки ИМКЭС СО РАН для метеорологического обеспечения
натурных испытаний материалов и изделий**

Тихомиров А.А.¹, д.т.н.; Корольков В.А.¹, д.т.н.

tikhomirov@imces.ru, kor@imces.ru

¹ИМКЭС СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический 10/3

Аннотация:

Представлены характеристики созданных в ИМКЭС СО РАН автоматизированных метеорологических приборов и оборудования для обеспечения натурных испытаний материалов и изделий. Среди них ультразвуковые автоматизированные метеостанции АМК-03 и их модификации, осуществляющие непрерывный мониторинг основных метеовеличин: трехкомпонентного вектора скорости ветра, температуры, влажности и атмосферного давления. Станции дополняются измерителями осадков, температуры и влажности почвы, солнечной радиации и др.

Ключевые слова:

натурные испытания, метеорологическое обеспечение.

При проведении натурных испытаний изделий и материалов при воздействии на них различных факторов окружающей среды необходимо контролировать метеорологические условия, в которых проводятся эти испытания. Основными факторами, влияющими на испытываемые изделия, являются температура и влажность воздуха, атмосферное давление, солнечная радиация, скорость ветра, атмосферные осадки (ГОСТ РВ 20.57.306-98). Дополнительными метеорологическими

величинами могут быть температура почвы (грунта) или воды, рН водной среды и др.

В последние двадцать лет широкое распространение, особенно за рубежом, получили ультразвуковые термоанемометры и ультразвуковые метеостанции (УАМС) на их основе [1], поскольку они не имеют вращающихся элементов конструкции. Большинство из перечисленных выше метеорологических величин может быть измерено с помощью таких УАМС. В ИМКЭС СО РАН разработана УАМС АМК-03 и ряд ее модификаций [2-5], которые выпускаются в ООО "Сибаналитприбор" (г. Томск). УАМС АМК-03 и ее модификации сертифицированы в качестве средств измерений гражданского и военного назначения (сертификаты RU.C.28.007 А № 29530 и RU.C.28.018 В № 23068). В таблице 1 представлены основные технические характеристики АМК-03. Внешний вид ее основного блока, применяемого в большинстве модификаций УАМС, – ультразвукового термоанемометра ДСВ-15 показан на рисунке 1,а. В цилиндре поз. 3 размещаются также датчики влажности и атмосферного давления. Там же установлены угловые акселераторы, которые учитывают возможные наклоны метеомачты (до 20° от вертикали), чтобы определить точное значение горизонтального ветра.

Таблица 1

Основные характеристики УАМС АМК-03

Измеряемая величина	Диапазон	Погрешность
Температура воздуха T , °С	минус 50 ... +55	$\pm 0,3$ при $T \leq 30^\circ\text{C}$ $\pm 0,5$ при $T > 30^\circ\text{C}$
Скорость горизонтальной составляющей ветра V , м/с	0,1 ... 40	$\pm(0,1 + 0,02V)$
Направление горизонтальной составляющей ветра, град	0 ... 360	± 4
Скорость вертикальной составляющей ветра w , м/с	-15 ... +15	$\pm(0,1 + 0,02w)$
Относительная влажность воздуха, %	5 ... 100	± 3
Атмосферное давление, мм рт. ст.	560 ... 800	$\pm 1,0$



Рис. 1 – Внешний вид ультразвуковых термоанемометров:
а – ДСВ-15: 1 – электроакустические преобразователи (излучатели и приемники);
2 – поддерживающая арматура; 3 – цилиндр с электронными элементами;
б – новая конструкция ДСВ-75

Габаритные размеры ДСВ-15 – $\varnothing 230 \times 380$ мм; масса – 1,4 кг; потребляемая мощность не более 1 Вт от сети постоянного тока 10 ... 36 В. В настоящее время разработан опытный образец новой модификации термоанемометра ДСВ-75 (рисунок 1,б) с уменьшенными габаритами – $\varnothing 127 \times 350$ мм. Ее конструкция имеет повышенную жесткость и такое расположение электроакустических преобразователей, при котором дуги поддерживающей арматуры в меньшей степени затеяют измерительный объем, где проходит воздушный поток, скорость которого измеряется. Это позволило расширить диапазон измеряемых скоростей ветра до 50 м/с, а за счет дополнительного подогрева электроакустических преобразователей новая конструкция обеспечивает измерение температуры воздуха, начиная от минус 70°C. УАМС АМК-03 измеряет мгновенные значения метеовеличин с частотой опроса датчиков 80 Гц, что позволяет определять турбулентные характеристики атмосферы.

Модификации АМК-03 [3] включают: стационарные с 12 метровыми мачтами, переносные [4] и транспортируемые на передвижных средствах [5]. УАМС "Эксметео" (ее военный аналог 1Б65) переносится в ранце и

имеет разборную мачту высотой 4 м (рисунок 2,а). УАМС может работать в автономном непрерывном режиме до 5 суток (определяется емкостью аккумуляторных батарей), при этом метеорологическая информация выдается на пульт оператора, а также записывается на логгер, либо может передаваться на внешний компьютер, если в месте измерения существует мобильная связь [6]. Станция обеспечена GPS-навигатором, что позволяет фиксировать координаты мест измерения метеопараметров. УАМС разворачивается одним оператором из транспортного положения (ранца) в рабочее за 20 минут.

Передвижные УАМС 1Б65Б имеют автоматически разворачиваемую мачту (4 м высотой), размещаемую на крыше транспортного средства (рисунок 2,б). Время разворачивания с процессом самотестирования УАМС составляет 3 мин. Разворачивание осуществляется оператором с пульта управления без выхода из транспортного средства [5].

Разработана также многоуровневая метеостанция (стационарный метеопост), в которой на трех уровнях (2; 10 и 30 м) установлены ультразвуковые термоанемометры, а у самой земли располагается датчик поверхностной температуры. Такая система обеспечивает прямые измерения турбулентных пульсаций температуры и ортогональных компонент скорости ветра с вычислением значений потоков тепла, импульса и масштаба Монина-Обухова, которые используются в качестве экспериментальных параметров в модельных универсальных функциях подобия. Это позволяет определять тип стратификации и вертикальные профили метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы и прогнозировать их на более высокие атмосферные слои [7].

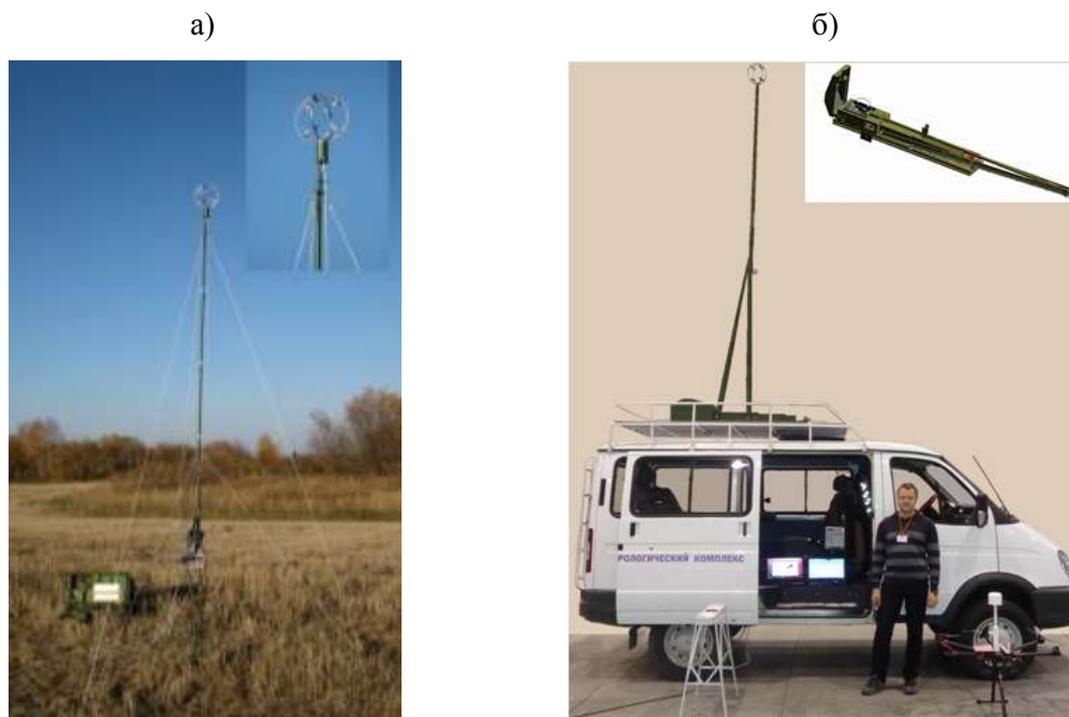


Рис. 2 – Развернутые УАМС: *а* – 1Б65; *б* – 1Б65Б на крыше автомобиля "Соболь" (вверху справа – мачта в сложенном состоянии)

Работу АМК-03 обеспечивают базовое программное обеспечение "МЕТЕО 3.0" и дополнительные приложения "МЕТЕО DB" и "МЕТЕО DP" [2, 3]. Приложение "МЕТЕО 3.0" считывает данные АМК-03 в компьютер и осуществляет их обработку с выдачей параметров, приведенных в таблице 1, либо в текущем режиме измерений на экран компьютера (рисунок 3), либо (в переносном варианте) – на пульт оператора усредненных данных (период усреднения задается от 1 до 20 минут). Кроме того, вычисляются стандартные статистические характеристики метеорологических величин (среднеквадратичные отклонения, коэффициенты корреляции и др.), турбулентные характеристики. "МЕТЕО 3.0" также обеспечивает автоматическую градуировку ДСВ-15.

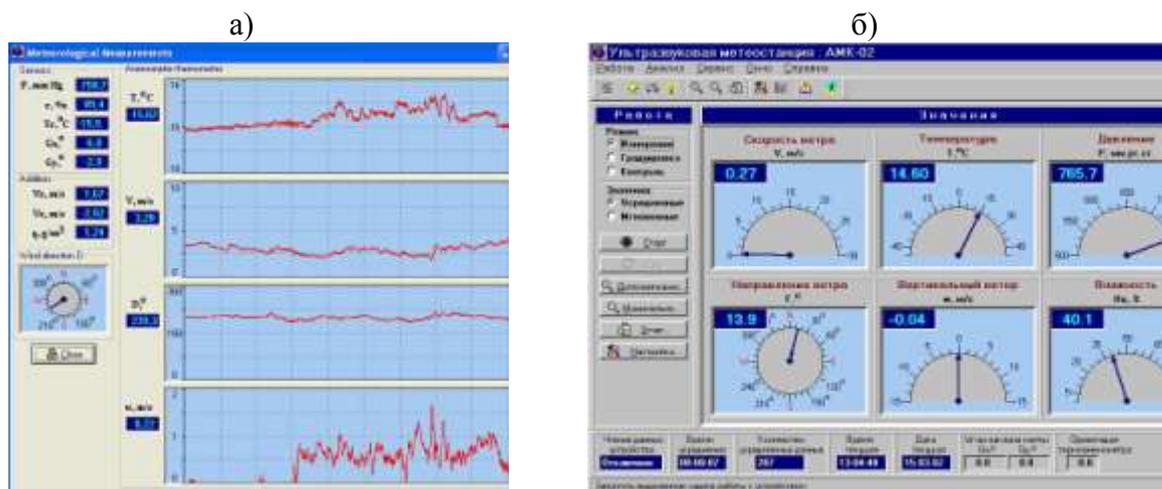


Рис. 3 – Примеры отображения значений измеряемых метеовеличин на экране компьютера: *а* – мгновенные значения (сверху вниз: температура воздуха; скорость горизонтального ветра; его направление; скорость вертикального ветра);
б – средние значения

ПО "МЕТЕО DB" и "МЕТЕО DP" совместно с ПО "МЕТЕО 3.0"

обеспечивают:

- определение и выдачу минимальных, максимальных и средних значений всех метеовеличин, сохраняемых в базе данных, а также их среднеквадратичных отклонений, за различные периоды наблюдений (часы, сутки, месяц, квартал, год);
- представление информации в графическом виде (за любой интервал времени);
- вычисление по загруженным выборкам стандартных статистических и турбулентных характеристик метеорологических величин;
- расчет гистограмм плотности вероятности турбулентных флуктуаций температуры и компонент скорости ветра;
- определение точки росы при измеренных значениях основных метеовеличин;
- расчет энергетических спектров турбулентных флуктуаций температуры и компонент скорости ветра (в частотном и пространственном масштабе) и др.

Разработаны варианты размещения АМС на борту беспилотных

летательных аппаратов (БПЛА) типа привязной аэростат и гексакоптер [7], что позволяет контактным способом измерять профили метеорологических величин до 1 км. При этом на гексакоптер устанавливается электронная метеостанция, измеряющая только температуру, влажность и атмосферное давление [8], а на привязной аэростат может устанавливаться как электронная метеостанция, так и УАМС типа АМК-03.

В ИМКЭС СО РАН разработан опытный образец измерителя атмосферных осадков (дождя, снега, града) ОПТИОС, основанный на оптическом методе измерения теневых изображений отдельных частиц [9, 10]. Прибор (рисунок 4,а) измеряет как интегральные характеристики осадков (интенсивность [мм/час] (рисунок 5, б) и сумму выпавших осадков [мм]), так и структурные (распределение частиц по размерам и скорость их падения) (рисунок 5, в-г). Размер измерительной площадки 48×100 мм.

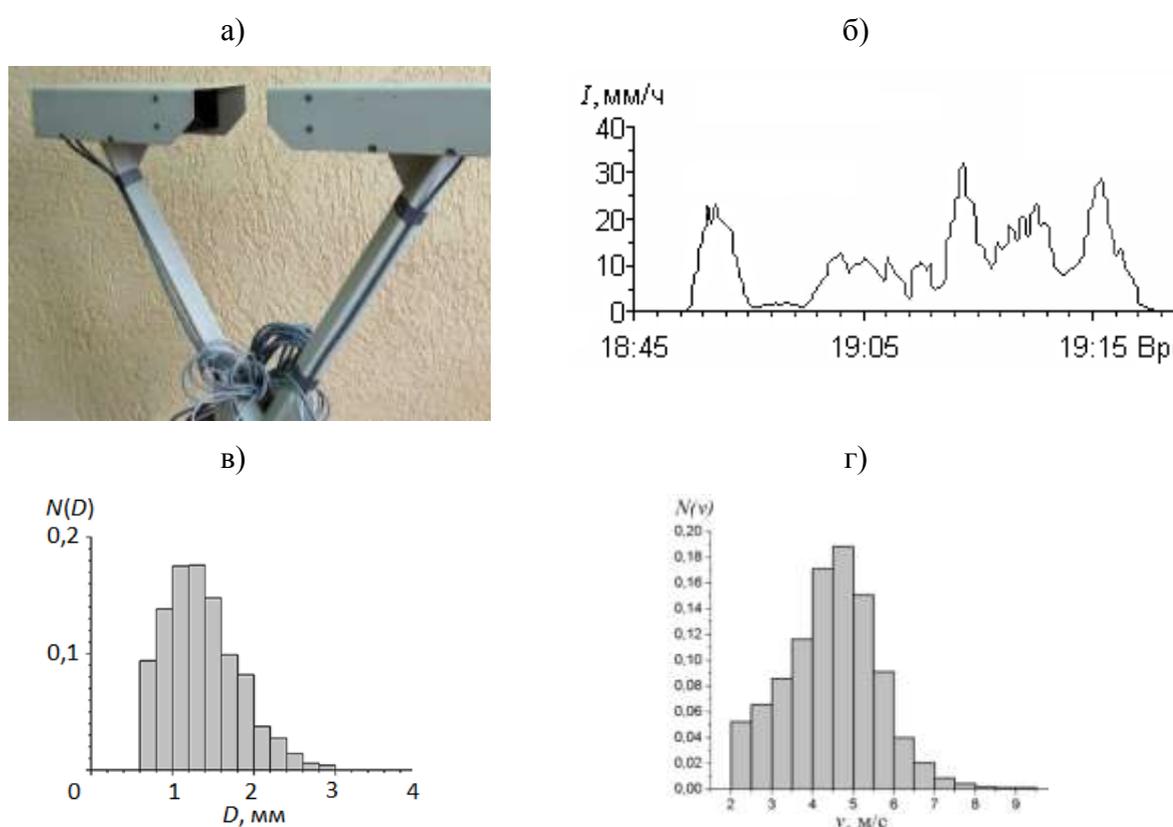


Рис. 4 – Оптический осадкомер ОПТИОС: а – внешний вид; б – изменение интенсивности дождя 15 июня 2016 г. в течение получаса; в – распределение капель по размерам во время дождя средней интенсивности (за 4,5 мин)

В таблице 2 представлены технические характеристики ОПТИОС.

Таблица 2

Технические характеристики ОПТИОС

Измеряемая величина	Диапазон	Погрешность
Размеры регистрируемых частиц D , мм	0,5 ... 10	$\leq 0,033 (10 + D)$
Оцениваемая скорость падения частиц v , м/с	0,2 ... 20	$\leq 5 \%$
Интенсивность дождя I , мм/час	0 ... 2000	
Чувствительность по количеству выпавших осадков Q , мм		$\leq 0,0001$
Определение времени начала/окончания выпадения осадков, мин		± 1

Прибор в автоматическом режиме обеспечивает определение вида выпадающих осадков (дождь, снег, град), исходя из их распределения по размерам и скорости падения. Рабочий диапазон температур от минус 20 до +60°C. Масса прибора 8 кг, потребляемая мощность (без системы обогрева) не более 1 Вт.

В ИМКЭС СО РАН создана также блочная система автономных измерителей метеорологического и экологического мониторинга – атмосферно-почвенный измерительный комплекс (АПИК). Он включает автономный контроллер регистратор и совокупность цифровых электронных датчиков [11], которые обеспечивают измерение профилей температуры и влажности грунта, скорости и направления горизонтального ветра, атмосферных осадков, характеристик снегового покрова, параметров солнечной радиации, уровня, проводимости и кислотности воды в водоёмах и грунте. Использование таких специализированных блоков в качестве дополнительных измерительных средств позволяет существенно расширить функциональные возможности базовой УАМС АМК-03.

В таблице 3 представлены технические характеристики АПИК, а на рисунке 5 показан внешний вид развернутого комплекса АПИК.

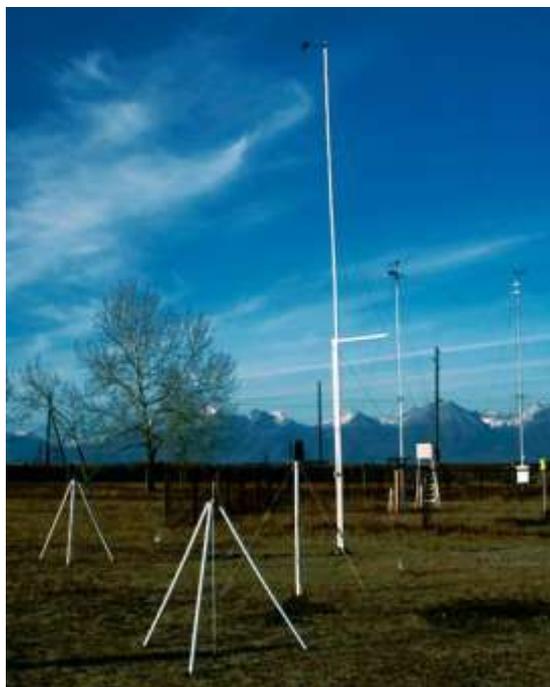


Рис. 5 – Внешний вид развернутых датчиков АПИК

Таблица 3

Технические характеристики АПИК

Измеряемая величина	Диапазон	Погрешность
Температура воздуха, грунта, °С	минус 50 ... +50	±0,1
Атмосферное давление, мм рт. ст.	500 ... 810	±1,0
Относительная влажность воздуха, %	5 ... 100	±3,5
Скорость горизонтальной составляющей ветра, м/с	0,9 ... 70	±5%
Направление ветра, град	0 ... 360	±5
Влажность грунта f , % (в температурном диапазоне от минус 15 до +50°С)	1 ... 100	±1% при $0 < f \leq 40$ ±2% при $40 < f \leq 100$
Количество выпавших осадков, мм		±0,22
Уровень грунтовых вод, см	0 ... 1050	±1%
Проводимость воды, См/м	10^{-8} ... 0,2	±5%
Уровень снежного покрова, см	0 ... 120	±5
Уровень солнечной радиации, Вт/м ² (в диапазоне длин волн 0,2 ... 10 мкм)	10 ... 2000	±5%

Таким образом, разработанное в ИМКЭС СО РАН и выпускаемое в ООО "Сибаналитприбор" метеорологическое оборудование, обеспечивает метеорологическими данными проведение натуральных испытаний опытных образцов аппаратуры и используемых в них материалов и комплектующих изделий в естественных условиях окружающей среды. Результаты измерений хранятся в базе данных компьютера и могут воспроизводиться в виде таблиц, графиков, гистограмм и т.п. Большая часть измерительного оборудования занесена в Госреестр средств измерений.

Литература

1 Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосферы и океана. 2010, Т. 23, № 7. С. 585–599.

2 Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология, 2006. № 11. С. 89–97.

3 Азбукин А. А., Богушевич А. Я., Кобзев А. А., Корольков В.А., Тихомиров А. А., Шелевой В. Д. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.

4 Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // Метеорология и гидрология, 2009. № 2. С. 101–106.

5 Тихомиров А.А., Корольков В.А., Богушевич А.Я., Азбукин А.А., Шелевой В.Д. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // Вестник академии военных наук. 2008. № 3 (24). С.144–148.

6 Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Коммутационный контроллер передачи

метеорологических данных // ПТЭ. 2010. № 4. С. 166.

7 Korolkov V.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Komarov A.I., Kobzev A.A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer // Proc. of SPIE. 2015. V. 9680. P. 96805Z.

8 Зуев В.В., Кураков С.А. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 994–999.

9 Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 7. С. 669–672.

10 Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение скорости падения дождевых капель при измерении их параметров оптическим осадкомером // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 29–32.

11 Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.

УДК 678

Применение программы FiberSIM в создании композитных конструкций самолетов-амфибий

Гежа С.А.¹; Штода А.Ю.¹

¹ПАО «ТАНТК им. Г. М. Бериева», г. Таганрог

Аннотация:

Описан современный метод моделирования, технологической проработки и изготовления деталей из композиционных материалов с использованием программного обеспечения FiberSIM, раскройной машины и лазерной проекционной установки. Проанализирована эффективность применения данного метода при создании композитных конструкций самолетов-амфибий. Показано использование программных и производственных средств для серийно выпускаемых изделий.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, программное обеспечение FiberSIM, раскройная машина, лазерная проекционная установка.

В настоящее время широкое распространение в нашей стране и за рубежом получила технология изготовления композитных деталей с использованием препрегов (полуфабрикатов, представляющих собой материал основы, пропитанный связующим составом), которые после послойной укладки подвергаются термостатированию в печи или автоклаве.

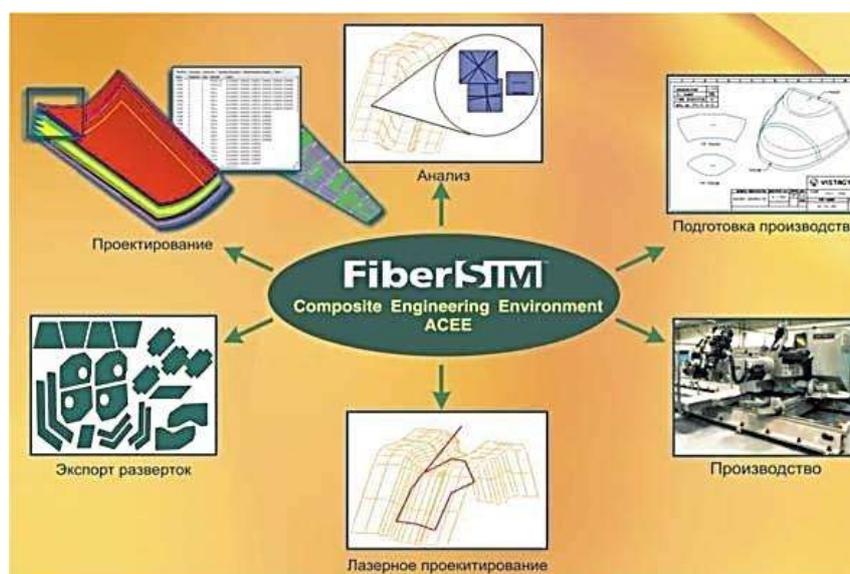
Повышение доли применения композиционных материалов в процессе модернизации конструкции планера самолетов-амфибий,

увеличение объема выпуска привело к тому, что ручной способ раскроя и позиционирования заготовок препрега все чаще находит ограниченное применение.

Становится понятно, что без автоматизации процессов проектирования и производства изделий из композиционных материалов (КМ) сегодня просто невозможно развивать отечественное самолетостроение, а тем более конкурировать на мировом рынке авиатехники.

Программное обеспечение FiberSIM получило наибольшее распространение для решения подобных задач. FiberSIM, это интегрированная в NX (Unigraphics) программа (интерфейс), предназначенная для проектирования изделий из композиционных материалов, моделирования слоев, моделирования процесса выкладки композиционного материала, подготовки разверток слоев выкладки и данных для машин автоматизированного раскроя, подготовки данных для лазерных проекционных систем, подготовки управляющих программ для комплексов автоматизированной выкладки препрега и волокна.

Схема, описывающая возможности и области применения показана на рисунке 1.



Данный программный продукт используется в сочетании с установками:

- автоматизированного раскроя препрегов;
- лазерного проецирования;
- автоматизированной выкладки препрегов.

Использование указанного программно-аппаратного комплекса обеспечивает:

- сокращение времени исходного проектирования;
- уменьшение времени внесения изменений;
- повышение эффективности использования материала;
- повышение прочностных характеристик изделий из ПКМ в среднем на 10%;
- снижение трудоемкости изготовления деталей из ПКМ до 30%;
- сокращение технологического цикла процесса выкладки деталей из ПКМ на 40%;
- постоянство заданных характеристик каждого изделия;
- улучшение условий труда и экологии при изготовлении деталей из ПКМ.

В целом схема работы с FiberSIM выглядит следующим образом. Сначала выбирается материал слоев, из которого будет формироваться изделие. Затем определяются общие параметры пакета слоев — ламината. При этом изделие может состоять из нескольких ламинатов. В зависимости от сложности изделия определяется метод формирования слоев. Послойный метод применяется для производства несложных деталей (в авиастроении это всевозможные обтекатели, створки, закрылки, элероны и др.), для чего задействуется модуль FiberSIM под названием CEE (Composite Engineering Environment — среда проектирования изделий из КМ). Для сложных изделий (например, отсеков фюзеляжа или панелей крыльев) используются методы зонного или структурного проектирования

с помощью модуля FiberSIM ACEE (Advanced Composite Engineering Environment — расширенная среда проектирования изделий из КМ). При проектировании подобных изделий часто применяют заполнители — сотовые, пенные и др. В FiberSIM формирование таких элементов осуществляется с помощью удобного диалогового окна назначением геометрических параметров. В процессе выкладки слоев задается их последовательность для получения сбалансированного по характеристикам изделия. В зависимости от метода производства изделия (ручная выкладка, формование, выкладка ленты, выкладка волокна) осуществляется послойный анализ материала на возможные деформации. А по его результатам определяются технологические способы устранения проблем. Если обнаружены излишки материала (гофр), то применяется команда «Надрез», если недопустимый натяг — «Вырез» с формированием слоя-заплатки. Состав слоев приводится в соответствие с шириной используемого материала. В зависимости от производственных условий могут быть введены технологические припуски. По завершении формирования слоев пользователь получает исчерпывающие, ассоциативно связанные с исходной геометрией трехмерные данные об изделии из КМ — набор автоматически формируемых послойных разверток материала. Развитый интерфейс позволяет применять их для различных целей, например:

- вывести в виде конструкторской документации, например послойного альбома эскиза слоев;
- отправить в файле формата DXF в виде исходных данных для раскроя материала на раскройных станках с ЧПУ;
- указав реперные точки, отправить информацию на лазерный проектор для точного обозначения контуров мест укладки выкроек и т.д.

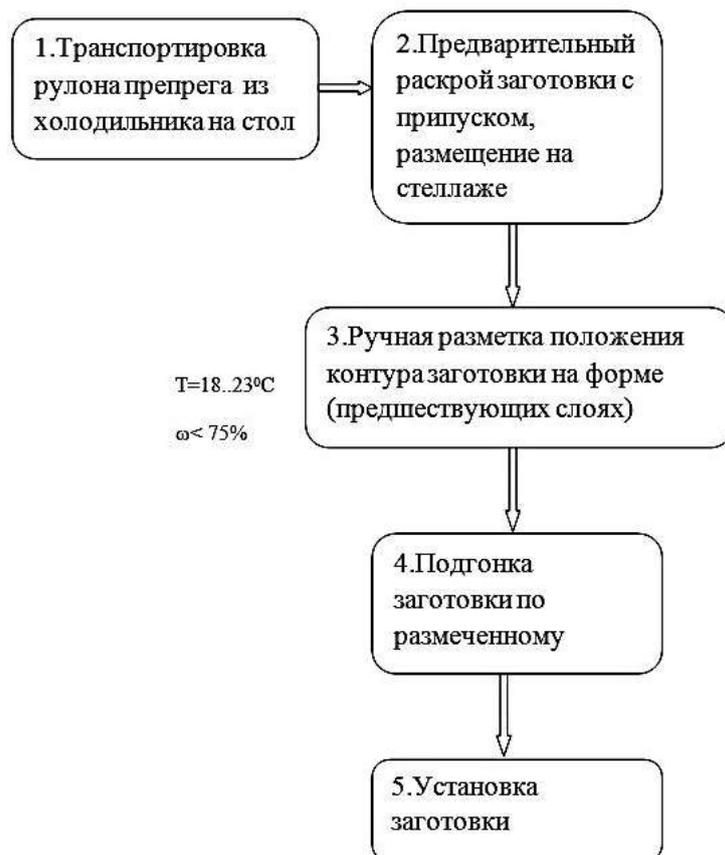
Переход на эту современную технологию проектирования и подготовки производства изделий из КМ позволяет:

- сократить расход композитных материалов за счет применения точных разверток и раскройных станков;
- увеличить скорость и повысить качество ручной выкладки материала за счет использования точных заготовок и лазерных проекций мест их выкладки;
- добиться высокого уровня повторяемости изделий;
- сократить влияние человеческого фактора на качество производимых изделий;
- снизить требования к квалификации персонала, занятого укладкой КМ.

В настоящее время для изготовления конструкций из композиционных материалов наибольшее распространение получил метод, основанный на использовании препрегов (предварительно пропитанных заготовок армирующего материала). В сочетании с препрегами также широко применяются сотовые или пенопластовые наполнители, пленочные клеи.

Для оптимальной работы с препрегами и пленочными клеями к производственным помещениям предъявляются требования по температуре и влажности: температура воздуха от 18 до 23°C, влажность не более 75%.

Технологический процесс преобразования препрега в заготовку детали при ручном способе раскроя и позиционирования можно представить в виде следующей блок-схемы (Рис. 2).



Конструктивно препрег состоит из армирующего материала и клеевой матрицы (связующего). При этом на драпируемость препрега влияют характеристики армирующего материала и вязкости связующего, а липкость препрега определяется свойствами связующего, существенно зависящими от температуры и влажности.

Драпируемость – способность препрега укладываться на поверхность двойной кривизны без складок и разрывов с минимальным искажением исходной структуры армирующей ткани.

Липкость – свойство препрега, определяющее адгезию слоев пропитанной ткани друг к другу в процессе послойной укладки.

Таким образом, технологические параметры препрега липкость и драпируемость препрега напрямую зависят от температурно-влажностного режима в цехе. Например, уже при $T=30^{\circ}\text{C}$ вязкость связующего уменьшается и деформирование заготовки препрега при ее перемещении

от раскройного стола к месту укладки происходит под собственным весом, а случайное слипание заготовки приводит зачастую к ее браку, к тому же из-за повышенной липкости достаточно сложно вести подгонку заготовки по месту. Особенно проблематично в таких условиях вести подгонку и сборку крупногабаритных заготовок препрега. С другой стороны, при понижении температуры, вязкость связующего в препреге возрастает, что приводит к уменьшению драпируемости заготовки и требует дополнительных разрезов заготовки для ее подгонки и сборке с другими слоями.

Возможными путями решения проблемы являются:

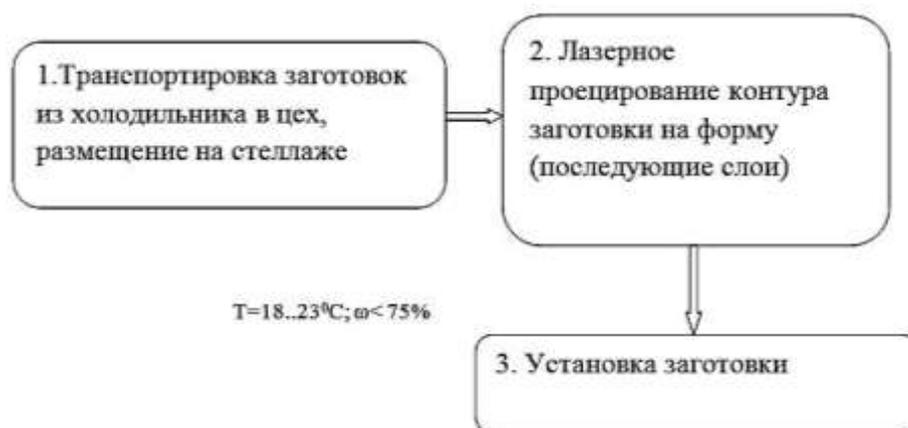
1. Натурное моделирование поведения препрега в лабораторных условиях и выдача в производство технологических рекомендаций по оптимальному технологическому раскрою заготовок в зависимости от допустимого температурно-влажностного режима в цехе, оснащение цехов шаблонами плоских разверток слоев.

К недостаткам метода относится следующее:

- a. экономическая нецелесообразность моделирования большого числа возможных комбинаций кривизны поверхности и температурно-влажностных параметров для данной марки препрега,

- b. при переносе на реальные детали модель оказывается несостоятельной из-за масштабного эффекта реальных заготовок.

2. Технологическое моделирование с использованием FiberSIM и автоматизацией операций раскроя и позиционирования заготовок препрега. В данном варианте блок – схема примет вид, показанный на рисунке 3.



Второй вариант имеет преимущество так как:

- Появляется возможность уменьшить площадь участка по набору заготовок препрега за счет их раскроя на раскройной машине в другом помещении. Освободившуюся от раскройных столов площадь целесообразно занять другой оснасткой, и таким образом повысить производительность с 1м² площади;
- За счет снижения объема помещения экономически проще обеспечить требуемый микроклимат, а соответственно поддерживать драпируемость и липкость препрега на оптимальном технологическом уровне;
- Обеспечивается повторяемость процесса набора слоев, за счет исключения операций ручной подгонки заготовок.

В заключении стоит сказать, что оптимальная организация производства изделий из ПКМ, в том числе предназначенных для самолетов-амфибий, вносит существенный вклад в базовую стоимость самолета, а использование ПО FiberSIM, автоматической раскройной машины и лазерных проекционных установок позволяет:

- Снизить производственную площадь на 17%;
- Снизить количество формовщиков на 25%;
- Уменьшить цикл изготовления изделия на 50%;
- Снизить трудоемкость изготовления композитных деталей не менее чем на 60%.

УДК 629.7

Современные системы для испытаний авиационных материалов и других объектов

Анчевский И.Э.¹; Ильин В.В.¹; Вальтер Р.¹

¹ ООО «Мелитэк»

Аннотация:

Представлен модельный ряд испытательного оборудования фирмы Walter+Bai AG (Швейцария). Приведен обзор методов работы компании «Мелитэк» при оснащении предприятий и исследовательских учреждений аэрокосмической области промышленности современным испытательным оборудованием. Представлена информация об алгоритмах работы, инновационных подходах компании при осуществлении поставок и внедрения современного оборудования для контроля качества авиационных материалов. Приведены доводы в пользу системного подхода при оснащении предприятий аэрокосмической отрасли современным оборудованием для контроля качества и прогнозирования свойств новых материалов.

Ключевые слова:

прочность, механические свойства, усталостные испытания, длительная прочность, ползучесть, термомеханическая усталость.

Введение

С 2000 г. ООО «Мелитэк» является эксклюзивным представителем швейцарской фирмы Walter+Bai AG, которая выпускает различные испытательные системы для определения механических свойств материалов

и компонентов. Выбор ООО «Мелитэк» в пользу Walter+Bai AG был сделан на основе всесторонней маркетинговой проработки рынка поставщиков испытательных систем по всему миру.

Критерии, по которым выбор пал именно на Walter+Bai AG, следующие:

1. Высококачественное и надежное оборудование. Наличие на фирме Walter+Bai AG серьезной технической и теоретической базы по изготовлению высококачественной испытательной техники и штата высококвалифицированных специалистов. Потому как Walter+Bai AG был создан в 1971 г. на базе всемирно известной фирмы “Альфред Амслер и Ко” испытательные машины которой до сих пор можно встретить на многих предприятиях по всему миру. Во многих испытательных лабораториях испытательные машины «Амслер» до сих пор выполняют испытания с высокой точностью. Испытательные машины фирмы Walter+Bai AG характеризуются большим запасом жесткости рам нагружения. Порядка 50% для статических систем и до 500% для динамических систем. Высокая жесткость испытательных систем гарантирует высокую точность испытаний и позволяет отказаться от дополнительных фундаментов для установки в лаборатории. Реактивные силы, возникающие в момент разрушения образца, практически полностью гасятся самой испытательной системой. Испытательные системы, включая машины большой мощности требуют только ровного пола лаборатории и устанавливаются на специальные абсорбирующие подкладки, которые поставляются вместе с испытательной техникой.

2. Работа под спецификации заказчика. Фирма Walter+Bai AG выгодно отличается индивидуальным подходом к заказчику и может выпускать испытательное оборудование не только в стандартной комплектации, но и под специфические требования серийных и исследовательских лабораторий. Причем изменение конструкции не влечет

за собой серьезного увеличения стоимости испытательных систем. Для разработки новых конструкций испытательных систем на фирме Walter+Bai AG работает бюро разработок.

3. Высококласный сервис. Для соответствующего сопровождения высококачественных испытательных систем на фирме Walter+Bai AG функционирует сервисный центр, который быстро реагирует на вопросы пользователей испытательного оборудования. Специалисты сервисного центра Walter+Bai AG находятся в тесном взаимодействии с сервисными специалистами ООО «Мелитэк».

4. Высокая точность испытательных систем. Все испытательные системы фирмы Walter+Bai AG имеют точность класса 0.5. Это значит, что погрешность на всем диапазоне нагрузок составляет не более 0,5% от измеренной величины. Высокая точность испытаний обеспечена высокой жесткостью рам нагружения.

5. Программное обеспечение. Программное обеспечение DION полностью на русском языке, включая сервисные функции и инструкции по эксплуатации. Программный пакет имеет двунаправленную открытую структуру и дружелюбный интерфейс. В этом пакете может работать и обычный оператор испытательной лаборатории с минимумом знаний ПК и инженер-исследователь в научно-исследовательской лаборатории. С помощью пакета DION можно создавать и сохранять любые испытательные процедуры (стандартные и нестандартные), любые протоколы и отчеты об испытаниях с помощью встроенного редактора протоколов.

Для заказчиков из России и стран СНГ на базе ООО «Мелитэк» создан и успешно функционирует Отдел физико-механических испытаний, в состав которого входят высококвалифицированные специалисты по комплектованию и поставкам испытательного оборудования фирмы Walter+Bai AG, обученные специалисты по вводу испытательных систем в

эксплуатацию непосредственно на предприятиях-заказчиках. Технические специалисты ООО «Мелитэк» проводят обучение начинающих пользователей испытательных систем сразу после ввода в эксплуатацию, осуществляют гарантийное и послегарантийное обслуживание систем Walter+Bai AG и их методическое сопровождение.

Вся испытательная техника Walter+Bai AG в 2001 г. успешно прошла сертификацию в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», разрешена к использованию в Российской Федерации и имеет соответствующие сертификаты Федерального Агентства по Техническому Регулированию и Метрологии РФ.

Модельный ряд испытательного оборудования фирмы Walter+Bai AG

Серия LFM. Электромеханические испытательные машины для статических испытаний с максимальными нагрузками от 1 до 1000 кН (от 100 кг до 100 т).

Серия LFMZ. Электромеханические испытательные машины для малоцикловых испытаний с максимальными нагрузками от 10 до 400 кН (от 1000 кг до 40 т). Малоцикловые испытания – это испытания при изменяющейся нагрузке с частотой от 0,5 до 1 Гц.

Серия LF. Сервогидравлические испытательные машины для статических испытаний с максимальными нагрузками от 50 до 3000 кН (от 5 т до 300 т).

Серия LFV. Сервогидравлические испытательные машины для статических и динамических испытаний с максимальными нагрузками от 1 до 25 000 кН (от 100 кг до 2 500 т). Динамические испытания на машинах серии LFV проводятся с частотой от 0.001 до 100 Гц в зависимости от амплитуды колебаний поршня машины.

Маятниковые копры серии PH. Испытательные системы для определения ударной вязкости различных материалов по методу «Шарпи»

(горизонтальная установка образца) и методу «Изод». Стандартные максимальные энергии удара от 5 до 750 Дж.

Температурное, климатическое и вакуумное оборудование. Все испытательные системы фирмы Walter+Bai AG могут оснащаться высокотемпературными печами с разными максимальными температурами нагрева диапазоне от до +200°C до +1700°C и климатическими камерами с диапазоном температур от -150°C до +600°C. Для отдельных приложений поставляются испытательные установки с вакуумными печами с глубиной вакуума до 10^{-6} мбар.

Наряду с поставкой новой испытательной техники, специалисты ООО «Мелитэк» проводят модернизацию существующего испытательного оборудования. Мы предлагаем различные пакеты модернизации существующих испытательных машин любых фирм-изготовителей. Модернизация Ваших испытательных систем обеспечивает управление процессом испытаний на качественно новом уровне, увеличивая их производительность и точность. Для нас не имеет значения фирма-изготовитель, мы просто заменим устаревшую систему управления на наш новейший цифровой контроллер и персональный компьютер с русскоязычным программным обеспечением для проведения любых типов испытаний. Мы предлагаем стандартные пакеты модернизации для гидравлических и электромеханических испытательных машин.

Область применения испытательных машин фирмы Walter+Bai AG

Серия LFM: машиностроение, металлургия, трубная промышленность

Серия LFV: авиастроение, биомеханика, научные исследования

Серия LF: испытания строительных материалов, металлургия

Серия LFMZ: авиационная металлургия, двигателестроение, автомобильная промышленность, атомная энергетика

Копры серии PH: все перечисленные области

Методы работы ООО «Мелитэк» в области поставок испытательной техники Walter+Bai AG

Принимая во внимание сложность такого оборудования как испытательная техника и для предотвращения ошибок, часто возникающих при выборе испытательного оборудования, ООО «Мелитэк» выработал следующую последовательность действий по поставке испытательных систем:

1. Получение от заказчика подробного опросного листа с описанием задач, стоящих перед испытательной лабораторией. Опросный лист передается заказчику при первом контакте.

2. На базе полученной информации из опросного листа составляется предварительное коммерческое предложение, которое обсуждается в тесном взаимодействии с заказчиком.

3. При одобрении коммерческого предложения со стороны руководства заказчика организуется посещение пользователей испытательного оборудования Walter+Bai AG на территории России или СНГ наиболее близкого к потенциальному заказчику, а также посещение завода изготовителя Walter+Bai AG и бюро разработок в Швейцарии.

4. В процессе посещения фирмы изготовителя, заказчик знакомится с модельным рядом испытательного оборудования, возможностями фирмы, а самое главное с широким диапазоном принадлежностей для испытаний, которые могут существенно расширить круг задач, решаемых на испытательных машинах и облегчить труд оператора. В рамках визита заказчик испытывает свои образцы прямо на заводе-изготовителе и совместно со специалистами ООО «Мелитэк» и Walter+Bai AG вырабатывает решение о необходимых принадлежностях, которыми должна быть оснащена его испытательная система.

5. После посещения завода-изготовителя в спецификацию вносятся необходимые корректировки и на её базе формируется договор.

6. После изготовления машина, заказчик приглашается вновь на инспекцию уже изготовленного оборудования, где опять испытывает свои образцы, но уже на своей машине. При необходимости в конструкцию вносятся необходимые корректировки прямо на заводе-изготовителе. Причем увеличение стоимости оборудования при этом не происходит.

7. В рамках инспекции на заводе-изготовителе заказчик проходит вводный курс обучения на своей испытательной машине.

8. Машина пакуется и отправляется конечному пользователю.

9. После доставки оборудования на предприятие заказчика, сервис инженеры ООО «Мелитэк» выезжают на это предприятие проводят монтаж оборудования и основной курс обучения специалистов заказчика.

10. Срок внедрения одной испытательной машины включая курс обучения составляет не более 5 рабочих дней.

Такая последовательность действий во-первых исключает ошибки в выборе испытательного оборудования, во-вторых обеспечивает ввод оборудования в эксплуатацию в возможно короткие сроки.

В заключении стоит сказать, что специалисты ООО «Мелитэк» имеют опыт работы с испытательным оборудованием различных поставщиков и сделали осознанный выбор в пользу Walter+Bai AG как наиболее перспективной и гибкой фирмы для рынка России и СНГ на данный момент.

УДК 629.735:620.191

Исследование общей и коррозионной повреждаемости летательных аппаратов Ан-12 с помощью простых статистических методов анализа

Барсуку В.Е.¹, к.т.н.; Калюта А.А.¹; Рудзей Г.Ф.¹, д.т.н.;

Ужакина О.М.¹; Фокин Е.А.¹; Тимофеев А.Н.¹

kalyuta47@mail.ru, rudzeig@sibnia.ru, ou-snia@yandex.ru,

fokine@sibnia.ru, A.Timofeev@sibnia.ru

¹ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина»

Аннотация:

С целью продления ресурса самолетов Ан-12 на основании выборки из пяти бортов осуществлена оценка часто встречаемых общих и коррозионных повреждений, полученных при эксплуатации. Использован анализ Парето для их классификации.

Ключевые слова:

авиационные конструкции, общие и коррозионные повреждения, статистический анализ.

Введение

На всех этапах создания и эксплуатации летательных аппаратов необходима организация процесса управления надежностью изделий, причем при принятии любого ответственного решения должны быть учтены его технико-экономические последствия. Остаточный потенциал работоспособности воздушного судна определен, в основном,

интенсивностью накопления и уровнем повреждений в тех элементах конструкции, отказы которых могут привести к постепенным отказам компонентов летательного аппарата или к возникновению аварийной ситуации. Повреждаемость изделий зависит от многих факторов, в том числе – особенностей их эксплуатации, климатических условий регионов базирования, культуры обслуживания.

В настоящее время, в связи со значительным сокращением объема лабораторно-стендовых исследований по продлению назначенных ресурсов стареющей авиационной техники и дороговизной новых летательных аппаратов, актуальным является их эксплуатация по техническому состоянию. Созданы независимые службы, производящие экспертизу технического состояния воздушных судов, накоплен большой материал по обнаруженным повреждениям и отказам, что позволяет с целью прогнозирования надежности изделий осуществлять анализ информации и выявлять тенденции развития повреждений и отказов.

В связи с необходимостью продления ресурса самолетов типа Ан-12, была поставлена задача на основании технической документации с результатами контроля силовой конструкции планера самолетов и исследования их технического состояния оценить, какие дефекты, включая коррозионные, на этих машинах являются наиболее часто встречаемыми.

Методы исследования

Для проведения такого анализа необходимо собрать дифференцированные статистические данные по повреждениям и отказам типовых воздушных судов или их компонентов, учитывающие возраст и особенности эксплуатации авиатехники. Требуется выявить немногочисленные существенно важные повреждения и отказы, к которым можно отнести или наиболее часто встречаемые, или влекущие наиболее тяжелые последствия, осуществить контроль накопления повреждений летательных аппаратах (ЛА) во времени. Для решения этих задач можно

использовать методы, применяемые в мировой практике менеджмента качества: анализ Парето, причинно-следственный анализ Исикавы [1], контрольные карты Шухарта [2] и другие. Эти простые методы позволяют делать важные выводы по самым различным техническим аспектам. Например, в работе [3] приведена контрольная карта Шухарта, полученная при анализе повреждаемости лопастей несущих винтов вертолетов Ми-2 на различных аэродромах базирования (рисунок 1).

Из рисунка 1 видно, что наиболее неблагоприятно по повреждениям обстоит дело на аэродромах 5, 6, 7, 9 (наблюдается выход точек за верхнюю контрольную границу). На этих аэродромах базирования необходимо провести комплекс корректирующих мероприятий, а до принятия мер аэродромы должны находиться под особым контролем.

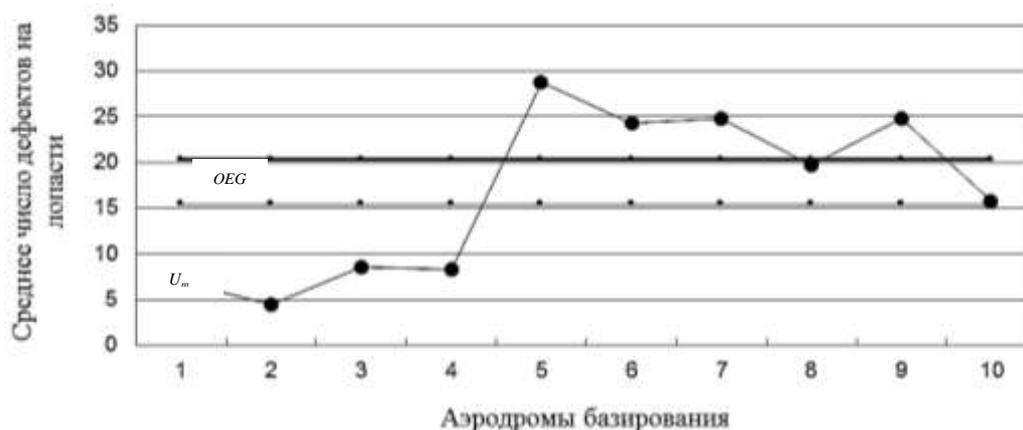


Рис. 1 – Повреждаемость лопастей несущих винтов вертолетов Ми-2 на различных аэродромах; здесь U_m – средняя линия карты, OEG – верхняя контрольная граница

Для решения поставленной задачи использован анализ Парето. Анализ Парето обязан своим именем разработчику этой техники, итальянскому экономисту В. Парето. Он первым открыл, что около 80% доли доходов или благ принадлежат менее чем 20% населения. Доктор Д. Джуран применил диаграмму Парето в сфере контроля качества и указал, что подавляющее число дефектов и связанных с ними потерь возникает из-за относительно небольшого числа причин (2 – 3), вызывающих около 80% отклонений, что представляет примерно то же соотношение 20 / 80. По

выявленным немногочисленным, но существенно важным факторам, необходимо осуществлять в первую очередь корректирующие и предупреждающие мероприятия. В каждом конкретном случае процент, обуславливающий границу между существенно важными и менее важными факторами, определяют исследователи. Алгоритм исследований включает следующее:

- сбор статистических данных;
- их ранжирование в соответствии с частотой появления (от большего к меньшему);
- вычисление накопленного (кумулятивного) процента появления события;
- построение гистограммы по выявленным дефектам и кумулятивной кривой;
- определение области первоочередных мероприятий;
- оценивание результативности и эффективности предлагаемых действий.

Результаты исследований

При анализе, выполненном в данной работе, осуществлено ранжирование дефектов по частоте их выявления. Анализ осуществлен по результатам обследования 5-ти транспортных самолетов Ан-12: Ан-12Б № 11130, 12ТБК № 11868, Ан-12Б № 93913, Ан-12 № 11767, Ан-12 № 11789. Осуществлено ранжирование дефектов по количественному признаку и построены диаграммы Парето по каждой машине. Также сделаны выводы по результатам анализа всей выборки из пяти машин. В таблицу 1 вынесены наиболее значимые по количественному признаку дефекты по 5-ти воздушным судам, где m – число дефектов по признаку, n — общее число дефектов. На рисунке 2 построен график Парето по выборке, создающей приблизительно 91% несоответствий. К категории немногочисленных, но существенно важных дефектов (их количество 82,6%), относятся:

- трещины обшивки носка левой и правой средней (СЧК) и отъемной (ОЧК) части крыла от углов эксплуатационных лючков (длиной до 7 мм);
- трещины обшивки форкиля в зоне пересечения диафрагм и стрингеров по правому борту;
- трещины обшивки и панелей по левой и правой СЧК, ОЧК;
- трещины от 10 до 26 мм обшивки верхней панели СЧК от отверстия под болт крепления пояса I-го и II-го лонжеронов между разными нервюрами крыла (НК);
- трещины от 3 до 32 мм обшивки верхней панели левой и правой СЧК от отверстий под крепеж крепления лапок стрингеров;
- трещины в центроплане от отверстий под болты крепления обшивки к лапке нижнего пояса II-го лонжерона центроплана в районе радиусного перехода (*R*-перехода) у первых левой и правой НК;
- трещины закрылка;
- трещины обшивки верхней и нижней панелей правой и левой СЧК от отверстий под крепеж крепления кницы;
- трещины в фюзеляже до 7 мм под болты рамы фонаря кабины штурмана в зонах под болты крепления к шпангоуту 1;
- трещины ремонтных накладок на фюзеляже;
- трещины обшивки панелей центроплана от отверстия под болт;
- трещины книц крепления стрингеров № № 43, 44, 45, 46 к ободам шпангоута № 16а фюзеляжа по правому борту;
- трещины 50 и 35 (32) мм профиля стыка фюзеляжа и форкиля по шпангоуту 55;
- трещины обшивки фюзеляжа;
- трещины нижней и верхней панелей крыла;
- трещины панелей центроплана.

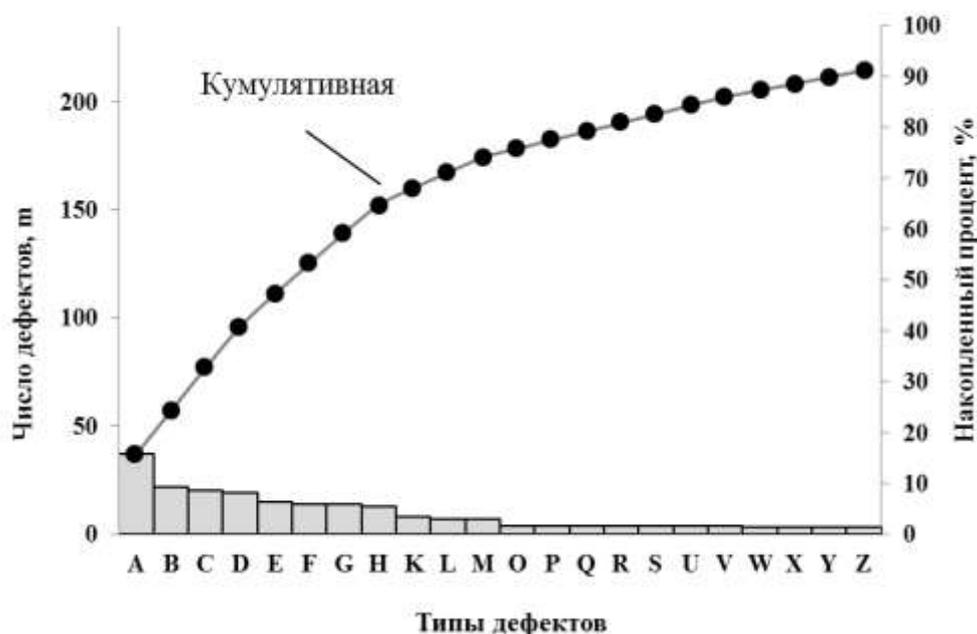


Рис. 2 – График по видам дефектов пяти самолетов Ан-12

Аналогично вышеизложенному проведено исследование коррозионной повреждаемости самолетов Ан-12. Построены диаграммы Парето по каждой машине. Выделены наиболее часто встречаемые коррозионные повреждения. В таблицу 2 вынесены наиболее значимые по количественному признаку коррозионные повреждения по 5-ти воздушным судам, а на рисунке 3 построен график Парето по выборке, создающей примерно 75% несоответствий.

К категории немногочисленных, но существенно важных коррозионных повреждений относятся:

- коррозия стрингеров I-й нижней технологической панели левой и правой СЧК;
- коррозия балки низинки шпангоутов 13, 23, 25, 30, 43 и области балки;
- коррозия стыковочных болтов левой и правой СЧК и центроплана;
- коррозия фюзеляжа в области ниши левой и правой основных опор шасси (ООШ);
- коррозия верхней панели левой и правой СЧК (ОЧК);

- коррозия в области верхней съемной панели центроплана;
- коррозия I-го лонжерона левой и правой СЧК;
- коррозия в области ободов шпангоутов фюзеляжа;
- коррозия верхней поверхности нижней горизонтальной полки II-го лонжерона левой СЧК;
- коррозия спинок стрингеров в области нижней панели центроплана;
- коррозия II-го лонжерона левой и правой СЧК;
- коррозия обшивки фюзеляжа;
- коррозия в области съемной панели центроплана.

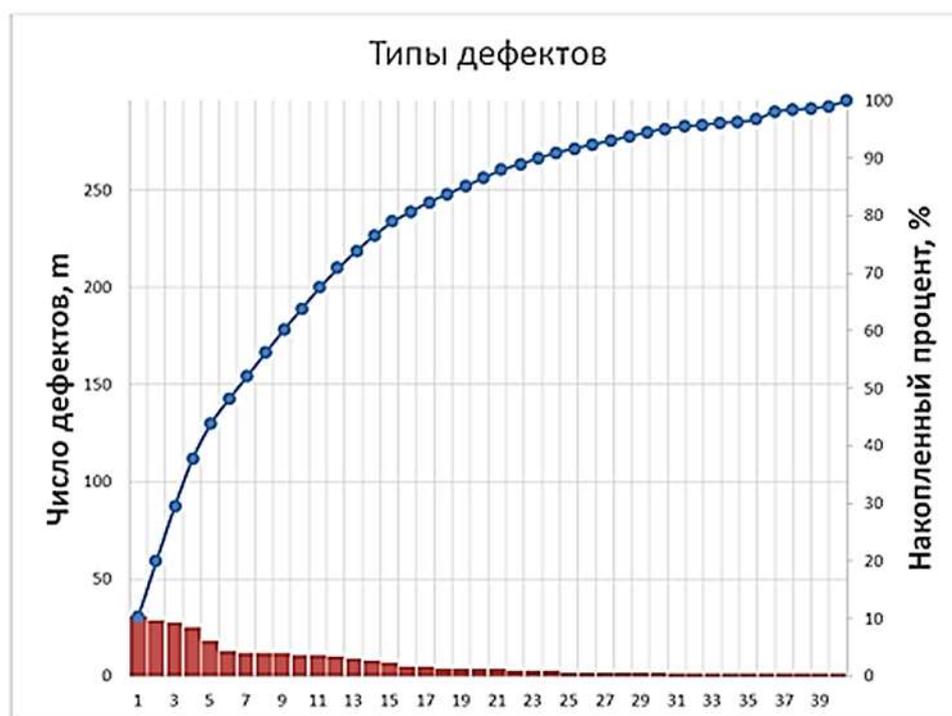


Рис. 3 – График по видам коррозионных повреждений по 5-ти самолетам Ан-12

Коррозионное повреждение способно снизить допустимую наработку воздушного судна в эксплуатации, назначаемую как по принципу безопасного ресурса, так и по принципу эксплуатационной живучести. Оценка критичности повреждения может быть выполнена при знании долговечности поврежденного элемента.

Выводы и рекомендации

1. С целью продления ресурса самолетов типа Ан-12 на основании технической документации по контролю силовой конструкции при оценке их технического состояния осуществлено ранжирование дефектов по количественному признаку. С использованием анализа Парето выявлены существенно важные повреждения.

2. Для установления причин появления повреждений и их устранения при возможной модификации самолета Ан-12 можно рекомендовать проведение причинно-следственного анализа Каору Исикавы, широко используемого в практике применения простых статистических методов при установлении диагноза процесса, в данном случае диагноза конструкции.

3. Возможно проведение анализа Парето по категории наиболее критичных дефектов и повреждений.

Литература

1. Статистические методы повышения качества. / Пер. с англ. под ред. Хитоси Кумэ. - М.: Финансы и статистика. 1990. С. 304.

2. Х.-Й Миттаг, Х. Ринне. Статистические методы обеспечения качества. / Пер. с нем. под ред проф. Б.Н. Маркова - М: Машиностроение. 1995. С. 601.

3. Калюта А.А., Рудзей Г.Ф. Исследование повреждаемости летательных аппаратов с помощью статистических методов обеспечения качества / Труды международной научной конференции «Мониторинг ЛА-2005». Ташкент. 2005. С. 231–235.

Таблица 1

Ранжирование дефектов по 5-ти самолетам Ан-12

№	Типы дефектов	Описание дефектов	m	$\frac{m}{n}$	Накопленный %
1	A	Трещины обшивки носка левой и правой СЧК, ОЧК от углов эксплуатационных лючков (до 7 мм)	37	0,157	15,7
2	B	Трещины обшивки форкиля в зоне пересечения диафрагм и стрингеров по правому борту	22	0,094	24,2
3	C	Трещины обшивки и панелей по левой и правой СЧК, ОЧК	20	0,085	32,7
4	D	Трещины от 10 до 26 мм обшивки верхней панели СЧК от отверстия под болт крепления пояса I-го и II-го лонжеронов между различными НК	19	0,081	40,8
5	E	Трещины от 3 до 32 мм обшивки верхней панели левой и правой СЧК от отверстий под крепеж крепления лапок стрингеров	15	0,064	47,2
6	F	Трещины в центроплане от отв. под болты крепления обшивки к лапке нижнего пояса II-го лонжерона центроплана в р-не радиусного перехода у 1НК левой и правой	14	0,06	53,2
7	G	Трещины закрылка	14	0,06	59,2
8	H	Трещина обшивки верхней и нижней панелей правой и левой СЧК от отверстий под крепеж крепления кницы	13	0,055	64,7
9	K	Трещины в фюзеляже до 7 мм под болты рамы фонаря кабины штурмана в зонах под болты крепления к шпангоуту 1	8	0,034	68,1
10	L	Трещины ремонтных накладок на фюзеляже	7	0,03	71,1
11	M	Трещины обшивки панелей центроплана от отверстия под болт	7	0,03	74,1
12	O	Трещины книц крепления стрингеров № № 43, 44, 45, 46 к ободам шпангоута № 16а фюзеляжа по правому борту	4	0,017	75,8
13	P	Трещины 50 и 35 (32) мм профиля стыка фюзеляжа и форкиля по шпангоуту 55	4	0,017	77,5
14	Q	Трещины обшивки фюзеляжа	4	0,017	79,2
15	R	Трещины нижней и верхней панелей крыла	4	0,017	80,9
16	S	Трещины панелей центроплана	4	0,017	82,6

17	U	Трещины обшивки фюзеляжа и входной двери	4	0,017	84,3
18	V	Трещины внешней обшивки нижнего аварийного люка между шпангоутами 5-6 у переднего обреза люка	4	0,017	86
19	W	Трещины балок в фюзеляже	3	0,013	87,3
20	X	Трещины 31 и 50 мм верхней и нижней обшивки хвостовой части левой СЧК	3	0,013	88,6
21	Y	Трещины по левому и правому заднему радиусному переходу окантовки лючка топливомера правой и левой СЧК между 3-4 НК по месту ранее выполненной выборки	3	0,013	89,9
22	Z	Трещины в шлиц-шарнире передней опоры шасси (ПОШ)	3	0,013	91,2
23	Прочие	Чеканка обшивки и ремонтной накладки носка закрылка правой и левой СЧК между 13 и 14 НК	3	0,013	92,5
24		Трещины длиной 6 мм и 10 мм ремонтной накладки носка правого закрылка по вырезу под винтовой подъемник у нервюры №5.	2	0,008	93,3
25		Трещины длиной 8 и 11мм фитинга T0213-504-1 в зоне шпангоута № 13 справа и слева	2	0,008	94,1
26		Трещина длиной 7 мм обшивки верхней панели правой СЧК от отверстия под заклепку крепления передней и задней лапки стрингера 2 между 9НК и 9аНК	2	0,008	94,9
27		Трещины L=3,4 мм обшивки носка левой СЧК от угла выреза под лючок между 3НК и 4НК, между 7НК и 8НК	2	0,008	95,7
28		Трещины длиной 26 и 25 мм по радиусному переходу вертикальной и горизонтальной полок нижнего пояса II-го лонжерона правой и левой ОЧК у 24 НК	2	0,008	96,5
29		Трещины в районе лючка топливомера	2	0,008	97,3
30		Трещина обшивки носка закрылка левой СЧК по 5НК от выреза под винтовой подъемник.	2	0,008	98,1
31		Порывы перкалевой обшивки триммера РН	2	0,008	99
Всего			235	≈1	≈100

Примечание.

В статье приняты сокращения:

СЧК — срединная часть крыла, ОЧК — отъемная часть крыла, ООШ — основная опора шасси, НК — нервюра крыла,

ПОШ — передняя опора шасси, РН — руль направления.

Таблица 2

Сводная таблица коррозионных дефектов для анализа Парето по 5-ти самолетам Ан-12

№	Типы дефектов	m	$\frac{m}{n}$	Накоплен-ный %
1	Коррозия стрингеров I-й нижней технологической панели левой и правой СЧК	31	0.104	10,4
2	Коррозия балки низинки шпангоутов 13, 23, 25, 30, 43 и области балки низинки	29	0.097	20,1
3	Коррозия стыковочных болтов левой и правой СЧК и центроплана	28	0.094	29,5
4	Коррозия фюзеляжа в области ниши левой и правой ООШ	25	0.084	37,9
5	Коррозия верхней панели левой и правой СЧК(ОЧК)	18	0.060	43,9
6	Коррозия в области верхней съемной панели центроплана	13	0.043	48,2
7	Коррозия I-го лонжерона левой и правой СЧК	12	0.040	52,2
8	Коррозия в области ободов шпангоутов фюзеляжа	12	0.040	56,2
9	Коррозия верхней поверхности нижней горизонтальной полки II-го лонжерона левой СЧК	12	0.040	60,2
10	Коррозия спинок стрингеров в области нижней панели центроплана	11	0.037	63,9
11	Коррозия II-го лонжерона левой и правой СЧК	11	0.037	67,6
12	Коррозия обшивки фюзеляжа	10	0.033	70,9
13	Коррозия в области съемной панели центроплана	9	0.030	73,9
14	Коррозия I-й нижней съемной панели левой и правой СЧК	8	0.027	76,6
15	Коррозия II-й нижней съемной панели левой и правой СЧК	7	0.024	79
16	Поверхностная коррозия труб мотоферм навески двигателей	5	0.017	80,7
17	Коррозия нижней поверхности нижней полки I-го лонжерона центроплана	5	0.017	82,4
18	Коррозия II-й нижней технологической панели левой и правой СЧК	4	0.014	83,8
19	Коррозия правой бортовой балки фюзеляжа в районе шпангоутов №31-33	4	0.014	85,2
20	Коррозия стабилизатора и II-го лонжерона стабилизатора	4	0.014	86,6
21	Коррозия стыковочных фитингов стрингеров в районе шпангоутов 40-42	4	0.014	88
22	Коррозия в области левой и правой бортовых балок шпангоутов 29-31	3	0.010	89
23	Сквозная коррозия стрингеров между шпангоутами 11-12 и шпангоутами 40-41	3	0.010	90

24	Коррозия внешней поверхности нижнего пояса II-го лонжерона между 4-5 нервюрами крыла левой и правой СЧК	3	0.010	91
25	Коррозия косынок крепления кронштейна проводки управления	2	0.007	91,7
26	Коррозия верхней поверхности нижнего пояса правой бортовой балки фюзеляжа шпангоутов 29-30	2	0.007	92,4
27	Коррозия наружной поверхности гидроцилиндра левой и правой амортистойки ООШ	2	0.007	93,1
28	Коррозия элементов конструкции в головной части фюзеляжа	2	0.007	93,8
29	Коррозия стенки шпангоута 41	2	0.007	94,5
30	Коррозия нижней вертикальной полки верхнего пояса правой бортовой балки у шпангоута 27	2	0.007	95,2
31	Коррозия горизонтальной полки нижнего пояса 1 НК правой	1	0.003	95,5
32	Коррозия элерона	1	0.003	95,8
33	Коррозия окантовки нижнего аварийного люка кабины экипажа	1	0.003	96,1
34	Коррозия ремонтного уголка, установленного по нижнему поясу левой ОЧК	1	0.003	96,4
35	Коррозия обшивки 2-ой верхней технологической панели правой ОЧК в зоне 2-го лонжерона	1	0.003	96,7
36	Коррозия верхней поверхности горизонтального профиля задней стенки ниши ПОШ	1	0.003	98,1
37	Коррозионное разрушение вертикальных фитингов крепления противопожарного трубопровода	1	0.003	98,4
38	Коррозия внутренней обшивки люка аварийного покидания кормовой кабины	1	0.003	98,7
39	Коррозия перестыковочных фитингов шпангоута 13а	1	0.003	99,1
40	Коррозия нижней поверхности нижней перестыковочной накладки (стрингер 8)	1	0.003	≈100
Всего, n		296	≈ 1,0	≈100

Здесь m – число дефектов по признаку, n — общее число дефектов.

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб; Загл. с экрана.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование
несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 10 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»
ГНЦ РФ)

Изд-во ФГУП «ВИАМ»

admin@viam.ru

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ
В СФЕРЕ СВЯЗИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

ФГУП НТЦ "ИНФОРМРЕГИСТР"

РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО
обязательного федерального экземпляра
электронного издания

№ 55802

Электронное издание на 1 CD-R
«Коррозия, старение и биостойкость материалов
в морском климате: материалы III Международной
научно-технической конференции, 7 сентября 2018 г.,
г. Геленджик: электронное издание. Москва, 2018.
ISBN 978-5-905217-32-6» (© 2018 ФГУП "ВИАМ").

Номер государственной регистрации обязательного экземпляра
электронного издания – 0321803393.

Производитель: ФГУП "Всероссийский научно-
исследовательский институт авиационных материалов".



И. о. директора ФГУП НТЦ "Информрегистр"

Т.В. Плескачева

11 октября 2018 г.